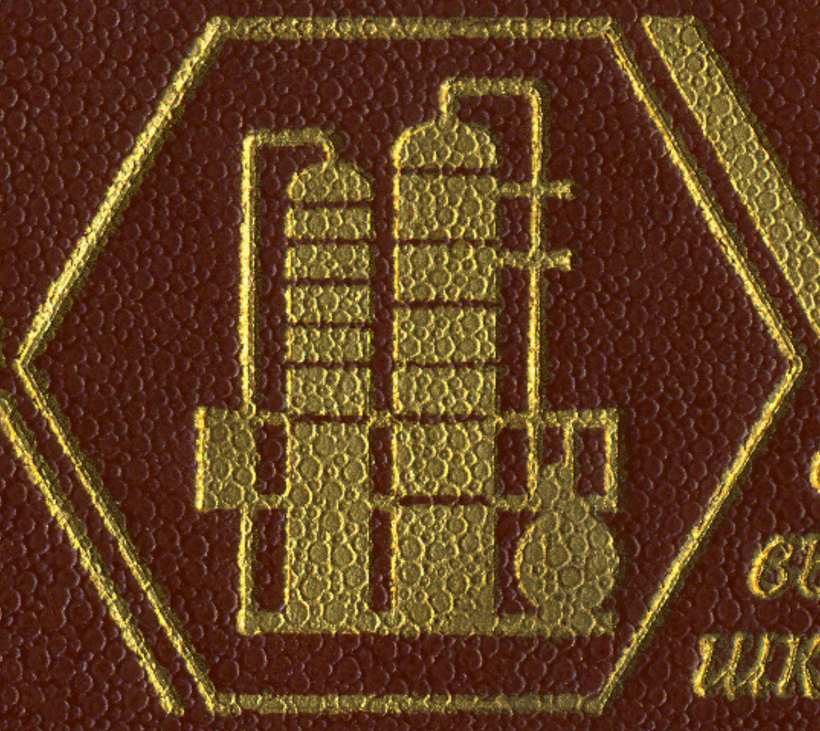


для высшей школы

Н. И. Басов
Ю. В. Казанков
В. А. Любартович

Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов

Для высшей школы

Н. И. Басов
Ю. В. Казанков
В. А. Любартович

Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Машины и технология переработки полимерных материалов в изделия и детали» и «Машины и аппараты химических производств».

МОСКВА
•ХИМИЯ•
1986

6П7.55

Б 275

УДК 678.057

Басов Н. И., Казанков Ю. В., Любартович В. А.

Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов: Учеб. для вузов. — М.: Химия, 1986. — 488 с., ил.

Изложены современные представления о технологических свойствах полимерных материалов, приведены технологические и механические расчеты оборудования для изготовления полимерных материалов и изделий различными методами. Каждому методу посвящена глава, включающая описание принципа формования, устройства соответствующего оборудования, теорию процессов, протекающих в рабочих органах оборудования.

Предназначена для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технология переработки полимерных материалов в изделия и детали».

488 с., 310 рис., 31 литературная ссылка.

Рецензенты: Доцент кафедры физики и механики полимеров ЛТИ им. Ленсовета к. т. н. В. А. БРАГИНСКИЙ и зав. кафедрой «Машины и технология переработки полимерных материалов» Тамбовского института химического машиностроения к. т. н. Н. В. ВОРОБЬЕВА.

Б $\frac{2803090000—133}{050(01)—86}$ 133—86

© Издательство «Химия», 1986 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 9
Введение 10

Глава 1. Технологические свойства пластмасс и резиновых смесей . . 16

1.1. Свойства порошкообразных и гранулированных материалов . . 16
1.1.1. Сыпучесть 17
1.1.2. Объемные характеристики 18
1.1.3. Фрикционные свойства 20
1.1.4. Теплофизические свойства 22
1.2. Физико-химические превращения в материалах при их переработке 24
1.2.1. Физическое состояние полимера 24
1.2.2. Реакции отверждения (вулканизации) 26
1.2.3. Термодеструкция 27
1.3. Реологические, теплофизические и адгезионные свойства расплавов пластических масс и резиновых смесей 29
1.3.1. Реологические свойства термопластов и резиновых смесей 30
1.3.2. Реологические свойства композиций на основе олигомерных связующих 37
1.3.3. Уравнение состояния 39
1.3.4. Зависимость реологических свойств реактопластов и резиновых смесей от степени химических превращений . . . 40
1.3.5. Теплофизические свойства 42
1.3.6. Адгезионные свойства 44

Глава 2. Оборудование для подготовки реактопластов к прессованию 44

2.1. Требования к состоянию материала при его загрузке в пресс-форму 44
2.2. Способы таблетирования 45
2.3. Эксцентриковые таблеточные машины 49
2.3.1. Конструкция 49
2.3.2. Циклограмма работы 51
2.3.3. Силовой расчет и определение мощности привода . . . 52
2.4. Ротационные таблеточные машины 55
2.5. Гидравлические таблеточные машины 58
2.6. Установки для нагрева таблеток токами высокой частоты . . 60
2.6.1. Принцип работы генераторов ТВЧ, расчет времени и мощности нагрева 61
2.6.2. Конструкции установок, правила безопасной работы на них 61
2.7. Установки для контактного нагрева таблеток 63
2.8. Червячные пластикаторы 64

Глава 3. Прессы для переработки реактопластов и резиновых смесей 68

3.1. Сущность метода прессования 68
3.1.1. Процессы, протекающие в пресс-форме 71
3.1.2. Общее устройство и работа пресса 75
3.2. Параметры пресса 78

3.2.1. Усилие и скорость прессования 79
3.2.2. Параметры, определяемые конфигурацией формуемого изделия и размерами пресс-формы 80
3.2.3. Стандартизованные параметры 81

3.3. Конструкция и расчет узлов и деталей пресса 81

3.3.1. Станины и плиты 81
3.3.2. Гидроцилиндры 87
3.3.3. Плунжеры 91
3.3.4. Уплотнения подвижных и неподвижных соединений . . 92
3.3.5. Нагревательные плиты 96
3.4. Гидропривод пресса 98
3.4.1. Рабочие жидкости 99
3.4.2. Типы насосов для индивидуального и группового гидроприводов 100
3.4.3. Аккумуляторы 102
3.4.4. Распределительная аппаратура 103
3.4.5. Гидросхемы управления прессом 107
3.4.6. Устройства, обеспечивающие безопасность работы на гидравлических прессах 108
3.5. Прессы-автоматы 109
3.5.1. Механизмы автоматической загрузки материала и съема изделий 110
3.5.2. Роторные прессы 113
3.5.3. Роторные линии 113
3.6. Специализированные прессы 115
3.6.1. Прессы для литьевого прессования реактопластов и резиновых смесей 115
3.6.2. Этажные прессы 116

Глава 4. Червячные машины 117

4.1. Сущность экструзионного метода 117
4.2. Общее устройство и работа червячных машин 119
4.3. Классификация червячных машин 122
4.3.1. Конструктивно-технологические признаки 123
4.3.2. Конструктивные признаки 127
4.4. Функциональные зоны канала червяка 129
4.4.1. Зона питания 130
4.4.2. Зона пластикации 132
4.4.3. Зона дозирования 135
4.4.4. Зоны канала червяка при переработке резиновых смесей и реактопластов 138
4.4.5. Совместная работа функциональных зон 140
4.4.6. Гидравлическое взаимодействие экструдера с головкой . 142
4.5. Движение порошкообразных и гранулированных материалов в зоне питания 143
4.5.1. Уравнение баланса сил, действующих на материал . . . 143
4.5.2. Производительность зоны питания 147
4.5.3. Мощность, затрачиваемая на транспортирование материала 148
4.6. Движение расплава в зоне дозирования 149
4.6.1. Производительность зоны дозирования 149
4.6.2. Изменение температуры расплава по длине зоны дозирования 152
4.6.3. Напорно-расходовая характеристика зоны дозирования . 153
4.6.4. Мощность, рассеиваемая в зоне дозирования 155

4.7. Работа зоны пластикации в режиме прилипания к стенкам канала 157
4.7.1. Переход материала в вязкотекучее состояние 157
4.7.2. Длина зоны пластикации 161
4.7.3. Мощность, рассеиваемая в зоне пластикации 162
4.8. Работа зоны пластикации в режиме скольжения материала по стенкам канала 164
4.8.1. Напорно-расходовая характеристика зоны пластикации . 164
4.8.2. Тепловой режим работы системы червяк—материал—цилиндр 166
4.8.3. Мощность, рассеиваемая в зоне пластикации 172
4.9. Особенности работы машин в циклическом режиме 172
4.10. Смешение расплава в канале червяка 175
4.11. Основные узлы и детали червячных машин 179
4.11.1. Червяки 179
4.11.2. Цилиндры 188
4.11.3. Фильтры 190
4.11.4. Упорный подшипник 193
4.11.5. Узел подвода жидкости к червяку 195
4.12. Регулирование температурного режима работы червячной машины 196
4.12.1. Системы теплоснабжения 196
4.12.2. Системы терморегулирования 197
4.12.3. Устройство элементов систем теплоснабжения . . . 199
4.13. Привод червяка 201
4.14. Бункеры, питатели 203
4.15. Двухчервячные машины 207
4.15.1. Принцип действия и применение 207
4.15.2. Классификация 209
4.15.3. Конструкции червяков 211
4.15.4. Производительность и мощность привода 213
4.15.5. Конструкции радиальных и упорных подшипников . . 216
4.16. Дисковые и червячно-дисковые экструдеры 220
4.16.1. Принцип действия 220
4.16.2. Производительность, мощность привода и осевое усилие на диске 222
4.16.3. Конструкции основных механизмов 227

Глава 5. Машины для литья под давлением 229

5.1. Сущность метода литья под давлением 229
5.2. Общее устройство и работа литьевой машины 231
5.3. Процессы, протекающие в литьевой форме 236
5.3.1. Заполнение формы 236
5.3.2. Выдержка под давлением 240
5.3.3. Выдержка на охлаждение (отверждение — вулканизацию) 242
5.4. Параметры литьевой машины 243
5.4.1. Расчет производительности и циклограммы работы литьевой машины 243
5.4.2. Давление литья и скорость впрыска 247
5.4.3. Пластикационная производительность 252
5.4.4. Параметры, связанные с габаритами формуемого изделия 253
5.4.5. Стандартизованные значения параметров 255
5.5. Конструкции литьевых машин 257
5.5.1. Взаимное расположение механизмов пластикации — впрыска и запирания формы 257
5.5.2. Принцип агрегатирования механизмов 258
5.5.3. Специальные литьевые машины 259
5.6. Механизмы пластикации и впрыска 264

5.6.1. Конструктивные разновидности 264
5.6.2. Типы привода во вращение и на осевое перемещение червяка 270
5.6.3. Расчет основных конструктивных параметров механизмов пластикации и впрыска 275
5.6.4. Дозирующие и загрузочные устройства 281
5.7. Механизмы запирания формы 282
5.7.1. Конструктивные разновидности 282
5.7.2. Конструкция и расчет гидравлических механизмов . . . 283
5.7.3. Конструкция и расчет гидромеханических механизмов . . 285
5.7.4. Расчет позиционности и темпа работы многопозиционных механизмов запирания формы 293
5.8. Гидросхема управления работой литьевой машины 295
5.9. Устройства, обеспечивающие безопасную работу на литьевых машинах 297

Глава 6. Машины для формования полых изделий 298

6.1. Сущность метода раздувного формования 298
6.2. Общее устройство и работа экструзионно-раздувных агрегатов 301
6.3. Классификация экструзионно-раздувных агрегатов 305
6.4. Основные процессы раздувного формования 305
6.4.1. Формование заготовки экструзионным методом 305
6.4.2. Формование заготовки литьевым методом 308
6.4.3. Раздув заготовки 309
6.4.4. Охлаждение изделия 310
6.5. Выбор конструкции и расчет циклограммы агрегата 311
6.6. Головки для экструзионного формования заготовок 315
6.6.1. Головки без копильника 315
6.6.2. Головки с копильником 316
6.6.3. Многоручьевые головки 316
6.6.4. Головки с программным управлением рабочими органами 318
6.7. Механизмы смыкания 320

Глава 7. Машины для переработки листовых термопластов пневмовакуумным формованием 325

7.1. Сущность метода формования 325
7.2. Процессы, протекающие при формовании 326
7.3. Разновидности метода пневмовакуумного формования . . . 331
7.3.1. Свободное, негативное и позитивное формование . . . 331
7.3.2. Формование с механической вытяжкой 331
7.3.3. Формование с пневматической вытяжкой 333
7.3.4. Формование с пневмомеханической вытяжкой 334
7.3.5. Пневматическое формование 335
7.4. Конструктивные разновидности оборудования для пневмовакуумного формования 335
7.5. Конструкция основных узлов машин для пневмовакуумного формования 339
7.5.1. Нагреватели 339
7.5.2. Прижимные устройства 341
7.5.3. Пневмовакуумные системы 343
7.5.4. Привод 347

Глава 8. Машины для ротационного и центробежного формования . . 349

8.1. Сущность метода ротационного формования 349
8.2. Оборудование для ротационного формования 351

8.2.1. Основные виды оборудования для ротационного формования 351
8.2.2. Формы для ротационного формования и способы их термостатирования 354
8.3. Сущность метода центробежного формования 356
8.4. Оборудование для центробежного формования 358

Глава 9. Валковые машины 360

9.1. Принцип действия вальцов и каландров 360
9.2. Технологические операции, выполняемые на валковых машинах 362
9.2.1. Операции, выполняемые на вальцах 362
9.2.2. Операции, выполняемые на каландрах 365
9.3. Классификация и параметры валковых машин 368
9.4. Процессы, протекающие в межвалковом зазоре 369
9.4.1. Поле скоростей и давлений 369
9.4.2. Толщина листа и производительность валковой пары . . 374
9.4.3. Распорное усилие, крутящий момент на валке и мощность привода валка 375
9.4.4. Вязкость материала в межвалковом зазоре 377
9.5. Конструкция и расчет основных узлов машин 379
9.5.1. Валки 383
9.5.2. Подшипники валков 387
9.5.3. Механизмы регулирования межвалкового зазора . . . 390
9.5.4. Устройства для компенсации прогиба валков 394
9.5.5. Привод валков 400
9.5.6. Станины 405
9.5.7. Предохранительные и аварийные устройства 406
9.6. Вспомогательные устройства 408
9.6.1. Ограничительные стрелы и ножи для обрезания кромок 408
9.6.2. Перемешивающие и возвратные устройства 410
9.6.3. Питающие и приемные устройства 411

Глава 10. Оборудование для производства резиновых технических изделий и шин 415

10.1. Резиносмесители периодического действия 417
10.1.1. Классификация и общее устройство 417
10.1.2. Деформационные процессы в рабочей камере 421
10.1.3. Поле давлений и скоростей в рабочей камере и мощность привода роторов 426
10.1.4. Конструкция и расчет смесительных камер и роторов . . 430
10.1.5. Конструкция и расчет основных механизмов 436
10.1.6. Регулирование теплового режима работы резиносмесителя 440
10.2. Резиносмесители непрерывного действия 442
10.3. Станки для сборки шин 445
10.3.1. Типы покрышек и методы их сборки 445
10.3.2. Конструкция сборочных станков 447
10.3.3. Сборочные барабаны 450
10.3.4. Привод барабанов 453
10.3.5. Механизм обработки борта 453
10.3.6. Механизм прикатчика 454
10.3.7. Линии сборки покрышек 455
10.4. Вулканизационное оборудование для покрышек 456
10.4.1. Операции формования и вулканизации 456
10.4.2. Типы оборудования 457
10.4.3. Формующее оборудование 457

10.4.4. Автоклав-прессы 458
10.4.5. Форматоры-вулканизаторы 460
10.4.6. Конструкция пресс-форм 466
10.4.7. Силовой и прочностной расчет форматоров-вулканизаторов 467
10.4.8. Линии вулканизации покрышек 471
10.5. Оборудование для вулканизации неформовых резиновых технических изделий 473

Глава 11. Оборудование для формования изделий из стеклопластиков 475

11.1. Классификация методов формования 475
11.2. Типы стеклонаполнителей 476
11.3. Оборудование, используемое при различных методах формования 476
11.3.1. Контактное формование 476
11.3.2. Напыление 478
11.3.3. Формование с помощью эластичной диафрагмы . . . 479
11.3.4. Прессование 481
11.3.5. Пропитка под давлением в замкнутой форме 483
11.3.6. Намотка 483

Рекомендуемая литература 486

ПРЕДИСЛОВИЕ

Подготовка инженера-механика в области создания и эксплуатации оборудования для переработки пластических масс и резиновых смесей в настоящее время основывается на приобретении молодым специалистом значительного объема теоретических и практических знаний, позволяющих решать широкий круг инженерных и прикладных научных задач. Курс «Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов» является итоговым, завершающим подготовку инженера-механика по специальности 0563 «Машины и технология переработки полимерных материалов в изделия и детали». Этот курс в последние годы получил дальнейшее развитие, что нашло отражение в его новой программе, утвержденной МИНВУЗом СССР в 1984 году.

В структуре настоящего учебника учтена основная особенность изучения дисциплины «Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов», заключающаяся в том, что студенты, приобретая специальность инженера-механика, получают знания в области конструирования и эксплуатации оборудования на основе углубленного изучения технологических процессов переработки пластмасс. В соответствии с этим гл. 1 посвящена описанию тех свойств перерабатываемых материалов, которые оказывают существенное влияние как на конструкцию, так и на энергосиловые параметры оборудования. Каждая из последующих глав содержит краткое изложение сущности метода формования, описание общего устройства соответствующего оборудования, теоретическое описание процессов, протекающих в его рабочих органах, и основанный на нем конструктивно-технологический расчет отдельных механизмов машин, а также конструктивные варианты этих механизмов. В конце учебника помещен список литературы, рекомендуемой студентам для углубленного изучения материала.

Учебник «Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов» создан впервые и обобщает многолетний опыт преподавания этого курса на кафедре «Полимерное машиностроение» Московского института химического машиностроения.

Авторы выражают глубокую признательность коллективам кафедры «Физика и механика полимеров» Ленинградского технологического института им. Ленсовета и кафедры «Полимерное машиностроение» Тамбовского института химического машиностроения, взявшим на себя труд по рецензированию настоящего учебника и сделавшим ряд ценных замечаний.

Авторы заранее благодарны всем, кто пришлет свои замечания или пожелания, касающиеся содержания учебника, поскольку сознают, что первый опыт в этой области не может быть свободен от недостатков.

ВВЕДЕНИЕ

Машины для переработки пластических масс и резиновых смесей служат для преобразования сырьевого полимерного материала в изделия путем изменения его свойств, состояния и формы. В результате реализуемых в машинах технологических операций из пластмасс и резиновых смесей получают различные виды изделий технического и бытового назначения.

Расчет, конструирование и изготовление этих машин осуществляется в нашей стране предприятиями и организациями ряда отраслей машиностроения: станкостроительной, инструментальной, химического и полимерного машиностроения, приборостроения, машиностроения для легкой и пищевой промышленности и других. Каждая из этих отраслей специализируется на выпуске конкретных видов машин, вспомогательного оборудования и комплексных технологических линий, полностью удовлетворяющих потребности нашей страны и стран-членов СЭВ в оборудовании для переработки пластмасс и резиновых смесей.

Полимерное машиностроение занимает особое место среди других отраслей машиностроения благодаря широким межотраслевым связям и большому ассортименту выпускаемого оборудования, применяемого в самых различных сферах народного хозяйства: химической, нефтехимической, легкой, пищевой, медицинской, электротехнической и других отраслях промышленности.

Переработка пластических масс и резиновых смесей представляет собой совокупность различных технологических процессов, с помощью которых исходный полимерный материал превращается в изделие с заранее заданными эксплуатационными свойствами. В настоящее время число разнообразных методов переработки пластмасс и резиновых смесей достигает нескольких десятков. Выбор метода переработки для изготовления изделия в каждом конкретном случае определяется такими факторами, как конструктивные особенности изделия и условия его эксплуатации, технологические свойства перерабатываемого материала, а также рядом экономических факторов (серийность, стоимость и т. д.).

Большинство методов переработки пластических масс и резиновых смесей предусматривает использование процессов формования изделий из полимеров, находящихся в вязкотекучем состоянии. Некоторые процессы основаны на достижении материалом в момент формования высокоэластического состояния. Находят промышленное использование методы формования из растворов и дисперсий полимеров.

В соответствии с назначением методы переработки пластмасс разделяются на подготовительные, основные и завершающие.

Подготовительные методы используются для улучшения технологических свойств перерабатываемого сырья, а также для получения полуфабрикатов и заготовок (таблеток, гранул, листов, шприцованного профиля, ленты), применяемых в основных методах переработки. Среди подготовительных методов можно выделить смешение, вальцевание, таблетирование, гранулирование.

Смешение служит для получения смеси из основного полимера и различных ингредиентов, существенно улучшающих свойства материала и изделий из него. Ввиду того, что ингредиенты вводятся в основной полимер в агломерированном виде, процесс смешения сопровождается одновременным диспергированием, т. е. измельчением ингредиентов.

Вальцевание заключается в многократном пропускании массы через зазор между валками; при этом на материал оказывается интенсивное силовое воздействие, приводящее к его разогреву, перемешиванию, гомогенизации. Вальцевание осуществляется не только для получения однородной массы материала или перевода материала в состояние, облегчающее его дальнейшую переработку (подогрев, пластикация), но может проводиться также с целью получения из полимерных материалов листов и пленок, охлаждения материала и придания ему формы, удобной для дальнейшей переработки, дробления, размола и рафинирования сырья.

Таблетирование применяется с целью получения из сырьевого материала (пресс-порошков, волокнитов) стабильных по массе прочных таблеток заданной формы. Использование таблетированного сырья при прессовании позволяет повысить точность дозирования, уменьшить потери сырья, снизить продолжительность производственного цикла, улучшить условия труда.

Гранулирование проводится для получения из расплава полимерного материала гранулята — сыпучего зернистого продукта, состоящего из однородных по размеру и форме частиц. Использование полимерного сырья в виде гранул стабилизирует режим работы перерабатывающего оборудования, облегчает дозирование сырья, повышает производительность машин и качество готовых изделий.

Изготовление изделий из полимерных материалов осуществляется главным образом в результате проведения следующих основных технологических процессов: прессование, экструзия, литье под давлением, раздувное формование, пневмо- и вакуумформование, ротационное формование, каландрование. Особую группу составляют методы получения покрышек и формования изделий из стеклопластиков.

Прессование является одним из наиболее распространенных методов переработки пластических масс. Материал в виде порошка, гранул или таблеток загружается в пресс-форму и подвергается воздействию тепла и давления. Область применения метода — изготовление штучных изделий из композиционных полимерных материалов: реактопластов и резиновых смесей.

Экструзия представляет собой процесс формования изделия продавливанием материала через формующий канал (профилирующий инструмент). Метод экструзии предназначен для получения различных изделий погонажного типа: труб, листов, пленки, профильных полос.

Литье под давлением включает в себя следующие основные технологические операции: подогрев материала (пластикацию), впрыск — заполнение формы, выдержка под давлением и выдержка на охлаждение (отверждение — в случае литья реактопластов и резиновых смесей). Литьем под давлением изготавливаются штучные изделия сложной формы из термопластов, реактопластов и резиновых смесей.

Раздувное формование служит для изготовления полых (объемных) изделий в виде бочек, бутылей, туб. Метод включает в себя следующие технологические операции: получение трубчатой заготовки, раздув заготовки сжатым воздухом в замкнутой форме, оформление изделия путем охлаждения или нагревания. Этим методом перерабатываются термопластичные материалы и резиновые смеси.

Пневмо- и вакуумформованием изготавливают изделия из листовых и пленочных термопластов. Сущность метода заключается в формовании полого изделия из предварительно нагретой заготовки в форме при создании избыточного давления или вакуума. Предельные размеры изделий при этом ограничиваются только размерами листовых заготовок и габаритами формы.

Ротационное и центробежное формование служит для получения объемных изделий и труб из порошкообразных полимерных материалов и пластизолей во вращающейся нагретой форме. Под действием центробежных сил материал прижимается к оформляющей полости формы, образуя тонкое покрытие, которое плавится под действием нагрева. Формоустойчивость изделий из термопластов достигается путем последующего охлаждения формы.

Каландрование, как и вальцевание, является процессом непрерывного продавливания полимерного материала через зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу валками. Но в отличие от вальцевания при каландровании материал пропускается через несколько зазоров с целью калибрования полученных рулонных материалов и пленок. Каландрование применяется также для изготовления профилированной ленты, промазки резиновой смесью тканей, обкладывания и дублирования, тиснения и обработки поверхности. Методом каландрования перерабатываются термопластичные материалы и резиновые смеси.

Изготовление резиновых покрышек (шин) включает в себя следующие операции: сборка покрышки, ее формование и вулканизация. Сборке предшествуют операции подготовительного производства: изготовление резиновой смеси, профилирование шинных заготовок (протектора, бортовых лент, наполнительного шнура и т. д.), обрезинивание текстильного или металлического корда, раскрой заготовок. Завершает технологический процесс производства покрышек операция вулканизации — превращения каучука или его композиции с другими компонентами в резину при нагревании вулканизуемого изделия под давлением.

Изготовление изделий из стеклопластиков осуществляется методами, весьма разнообразными по аппаратурно-технологическому оформлению. Это обусловлено особенностями исходных материалов, формой и размерами изделий. Технологический процесс изготовления изделий из стеклопластиков, несмотря на большое разнообразие самих методов формования, состоит из следующих операций: подготовка связующего и наполнителя, совмещение связующего и наполнителя, формование изделия. Методы формования изделий из стеклопластиков подразделяются: на открытые и закрытые; на методы формования под давлением и без давления; на методы формования с предварительным совмещением связующего и наполнителя с последующим формованием или при осуществлении всех этих процессов одновременно.

Завершающие методы предназначены для придания готовым изделиям определенного внешнего вида, создания неразъемного соединения отдельных элементов изделия. Важнейшими из этих методов являются механическая обработка изделия, сварка, нанесение декоративных покрытий.

Все перечисленные методы переработки пластических масс и резиновых смесей получили широкое промышленное распространение.

Основными направлениями дальнейшего совершенствования технологии переработки полимерных материалов являются: а) улучшение технологических свойств перерабатываемых материалов, расширение номенклатуры перерабатываемых материалов; б) разработка технологических разновидностей методов; в) повышение производительности путем оптимизации технологических параметров процессов; г) использование возможностей получения изделий в интенсифицированных режимах.

На современных типах оборудования для переработки пластмасс и резиновых смесей, выпускаемого в Советском Союзе и за рубежом, реализуются практически все существующие технологические разновидности методов переработки. Широкая но-

менклатура оборудования объясняется многочисленностью способов формования, обусловленной разнообразием свойств и областей применения полимерных материалов. На перерабатывающих производствах кроме основного оборудования используется вспомогательное типовое оборудование для транспортировки и сушки сырья, расфасовки и складирования готовых изделий.

Основное оборудование для переработки пластических масс и резиновых смесей может быть подразделено в соответствии с основными стадиями процесса производства на оборудование для подготовки, собственно формования и обработки, отделки и сборки.

К оборудованию подготовительных производств следует отнести таблеточные машины, агрегаты для предварительного подогрева таблеток, смесительное оборудование различных типов, вальцы. Формующее оборудование представлено прессами, червячными машинами (экструдерами), литьевыми машинами, машинами для раздувного, ротационного, пневмо- и вакуумформования, каландрами. Изделия из стеклопластиков формуются, как правило, на специальном оборудовании. Однако используются и стандартные прессы и литьевые машины. Формование покрышек осуществляется в специальных видах оборудования (автоклав-прессах, форматорах-вулканизаторах).

Технический уровень оборудования — мощность, степень автоматизации, универсальности и специализации определяет уровень производств переработки полимерных материалов. Внедрение новейших достижений науки и техники в области переработки пластических масс и резиновых смесей становится возможным путем создания современного проекта производства. При создании этого проекта различают две взаимосвязанные инженерно-технические задачи: функциональное, или технологическое, проектирование и техническое, или конструкционное, проектирование.

Цель технологического проектирования состоит в разработке оптимальной технологической схемы производства или предприятия и в определении оптимальных технологических и конструктивных параметров машин и технологических режимов их эксплуатации. Технологическое проектирование осуществляется инженерами-технологами при разработке как эскизного, так и технического проектов производства и предприятия.

Целью конструкционного проектирования является выбор и разработка чертежей основного и вспомогательного технологического оборудования и оснастки, разработка объемно-планировочных решений (компоновки) производства. Задачи конструкционного проектирования решаются инженерами различных специальностей (механиками, электриками, конструкторами) при активном творческом сотрудничестве с инженерами-технологами на этапах создания технического и рабочих проектов объекта.

На этапе конструкционного проектирования инженерами создается конструкторская документация — графические и текстовые документы, определяющие устройство изделия и содержащие необходимые данные для его разработки и изготовления. Проведя анализ состояния и поведения полимерного материала на разных этапах технологического процесса при различных значениях его параметров, инженер-конструктор создает конструкцию машины, включающую: схему устройства и работы машины, конструкции основных функциональных узлов и механизмов, их взаимное расположение, способы соединения и взаимодействия, материалы, из которых они должны быть изготовлены.

При современном конструировании оборудования широко применяется принцип агрегатирования — создания укрупненных узлов машины (комплекса машин), самостоятельно выполняющих отдельные рабочие функции. Это создает предпосылки для унификации оборудования, для создания гибких автоматизированных производств (ГАП) из машин, действующих согласованно, по единой программе, способных быстро перестраиваться на изготовление новых изделий.

В условиях постоянного увеличения масштабов проектирования решающее значение приобретает постоянное совершенствование принимаемых инженерных решений, резкое улучшение выпускаемой технической документации при сокращении сроков проектирования. Это становится возможным благодаря применению САПР (систем автоматизированного проектирования), решающих задачи проектирования в режимах диалога проектировщика с ЭВМ при помощи комплекта технических устройств ввода и вывода информации.

При проектировании машин для переработки пластмасс и резиновых смесей значительное место уделяется автоматизации технологических процессов, внедрению многопозиционного оборудования, роторных и роторно-конвейерных линий. Для обслуживания основного технологического оборудования применяются робото-технологические комплексы, состоящие из автоматических роботов-манипуляторов программного управления. Применение автоматизированных видов полимерного оборудования позволяет полностью исключить ручной труд, сократить общую продолжительность технологического цикла и повысить стабильность качественных показателей готовых изделий.

ГЛАВА 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТМАСС И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

В условиях возрастающей механизации и автоматизации процессов переработки пластмасс и резиновых смесей важное значение приобретает анализ технологических свойств полимерного сырья. *Технологическими свойствами* называются характеристики материала, необходимые для расчета параметров технологического процесса. К параметрам процесса относятся величины, задание которых необходимо и достаточно для изготовления изделий определенного качества в каждом конкретном случае. Точное знание технологических свойств материала необходимо для наиболее рационального выбора технологического режима переработки, установления области оптимального сочетания технологических параметров процесса, обеспечивающего получение высококачественных изделий. Комплекс технологических свойств перерабатываемого материала оказывает влияние и на технологически обоснованный выбор энергосиловых и кинематических параметров перерабатывающего оборудования, конструкцию привода и рабочих органов машин, быстроту износа формующего инструмента.

1.1. СВОЙСТВА ПОРОШКООБРАЗНЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Большинство термопластичных и термореактивных полимерных материалов в исходном состоянии перед переработкой представляет собой гранулированный или порошкообразный сыпучий продукт. Наиболее удобны в переработке гранулированные материалы — монодисперсные сыпучие зернистые продукты, состоящие из однородных по размеру и форме частиц. Размер гранул термопластов и реактопластов колеблется в большинстве случаев от 2 до 6 мм. Гранулированные материалы с шарообразной формой частиц обладают максимальной плотностью, хорошей сыпучестью, минимальной удельной поверхностью, что снижает поглощение влаги и летучих веществ из окружающей среды.

Сыпучие материалы с частицами неправильной формы и размером до 2 мм принято относить к порошкам. Термопласты и реактопласты перерабатывают в порошкообразном виде в том случае, если процесс дополнительного гранулирования приводит к ухудшению их свойств, например, к деструкции полимера или его отверждению. Вследствие несовершенства технологического процесса производства промышленные порошки

всегда полидисперсны, т. е. содержат частицы разных размеров и форм.

Для гранулированных и порошкообразных полимерных материалов характерна высокая пористость, обусловленная наличием в частицах сквозных или замкнутых пор, а также пустот между отдельными частицами. Объем пустот связан с плотностью укладки частиц в объеме порошка и зависит от размера, формы и состояния поверхности частиц.

Определение специфических технологических свойств порошкообразного и гранулированного сырья в исходном состоянии необходимо для расчета объема загрузочного бункера всех видов перерабатывающего оборудования, определения производительности и энергосиловых параметров смесительных и транспортирующих устройств и устройств для предварительного нагрева сырья до температуры его переработки. К таким технологическим свойствам относятся прежде всего сыпучесть, плотность, коэффициент трения и теплофизические свойства.

1.1.1. Сыпучесть

Сыпучесть характеризует способность материала равномерно истекать через отверстие в стенке сосуда. Этот показатель зависит от трения между частицами и определяет возможность стабильного и точного дозирования материала. Сыпучесть оценивается чаще всего скоростью опорожнения металлической воронки с круглым отверстием определенного диаметра. По ГОСТ 5689—73 сыпучесть прессовочных фенольных материалов определяется на стальной воронке, имеющей угол 40° и отверстие диаметром 10 мм. Угол конусности воронки и диаметр отверстия при испытаниях различных порошкообразных и гранулированных материалов может изменяться.

Сыпучесть $C_п$ подсчитывают по уравнению

$$C_п = M/t \qquad (1.1)$$

где M — масса навески, кг; t — время высыпания навески, с.

Для объемного дозирования пригоден порошок с сыпучестью не ниже 10^{-3} кг/с.

Критериями оценки сыпучести порошков и гранулята наряду со скоростью высыпания через отверстие конической воронки могут служить угол естественного откоса, угол обрушения, слеживаемость и др.

При определении *угла естественного откоса* сыпучий материал свободно насыпают на горизонтальную поверхность в виде конусной горки и замеряют угол между основанием и образующей этого конуса. При увеличении сыпучести материала угол естественного откоса уменьшается. Для порошкообразных и гранулированных материалов он составляет, как правило, от 30 до 50°.

Угол обрушения — это угол между горизонтальной плоскостью и образующей конуса, получаемого при самопроизвольном обрушении слоя сыпучего материала через отверстие в горизонтальной плоскости. Для порошков и гранулята этот угол находится в интервале от 50 до 80°.

Оценка *слеживаемости* материала осуществляется на специальном приборе (конический бункер, оснащенный набором выходных цилиндрических каналов). Считается, что материал слеживается, если до хранения в бункере он свободно высыпался через отверстие определенного диаметра, а после нахождения в приборе в течение 24 ч в нем образовался свод. Чем выше сыпучесть материала, тем меньше у него склонность к слеживанию. Слеживаемость полимерных материалов существенно возрастает с увеличением высоты слоя, что объясняется уплотнением и конгломерацией частиц в нижних слоях материала. К слеживанию особенно склонны мелкозернистые и влажные материалы.

Порошкообразные и гранулированные полимерные материалы, обладающие плохой сыпучестью, при хранении быстро слеживаются, и зависают на стенках бункеров перерабатывающего оборудования, в результате чего нарушается равномерность его питания. Нарушение подачи материала в экструзионные машины приводит к колебаниям производительности установки и в конечном итоге — к разнотолщинности погонажных изделий в продольном направлении. При таблетировании порошков, обладающих плохой сыпучестью, получаются неоднородные по массе таблетки. Колебания производительности при прессовании и литье под давлением вызывают недопрессовки, недолив или, наоборот, образование облоя готовых изделий.

Сыпучесть порошкообразных и гранулированных материалов во многих случаях удается повысить за счет подсушки и предварительного подогрева сырья. Для предупреждения слеживания и улучшения сыпучести могут быть использованы специальные загрузочные устройства, в которых осуществляется предварительное взрыхление и принудительная подача материала из бункера в загрузочное отверстие машины. Весьма эффективно для этих целей использование червячных питателей или вибрационных систем питания.

1.1.2. Объемные характеристики

Термином *«объемные характеристики»* объединены следующие показатели свойств порошкообразного и гранулированного сырья: насыпная плотность, удельный объем, насыпная плотность и удельный объем утряски, коэффициент уплотнения.

Насыпная плотность и *удельный объем* представляют собой соответственно массу единицы объема (кг/м^3) и объем единицы массы (м^3/кг) свободно насыпанного материала; они связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью. *Насыпная плотность* и *удельный объем утряски* характеризуют объемные свойства сыпучих материалов после их уплотнения посредством утряски до постоянного объема. *Коэффициент уплотнения* $K_у$ представляет собой отношение плотности материала в конечном отформованном виде $\rho_к$ к насыпной плотности сырья $\rho_н$:

$$K_у = \rho_к/\rho_н$$

ГОСТ 11035—64 регламентирует проведение измерения объемных характеристик полимерных материалов путем насыпания материала в мерный сосуд известного объема и определения массы материала в сосуде путем взвешивания. Плотность материала в отформованном изделии определяется гидростатическим, пикнометрическим или другими способами.

Объемные характеристики порошкообразных и гранулированных полимерных материалов зависят от плотности и формы частиц, гранулометрического состава, влажности, условий изготовления и транспортирования, продолжительности хранения. Наибольшей насыпной плотностью при прочих равных условиях обладают материалы со сферической формой частиц, так как в этом случае достигается наибольшая плотность упаковки. С увеличением влажности сырья влага скапливается в порах частиц или между частицами, при этом происходит некоторое уплотнение материала. Насыпная плотность зависит также от заряда статического электричества, приобретенного частицами в процессе измельчения или при транспортировании. Для многих полимерных материалов характерно уменьшение насыпной плотности с ростом степени электризации.

Важное практическое значение имеют данные о зависимости объемных характеристик от давления, т. е. о *сжимаемости* сыпучей массы полимерного материала. В процессах транспортирования материала в питателях и червячных пластикаторах, сопровождающихся сжатием, насыпная плотность его может изменяться в несколько раз. В процессе уплотнения сыпучих материалов различают ряд последовательных стадий. Первая стадия соответствует сближению частиц, вторая — заполнению промежутков между частицами в результате их упругих и пластических деформаций. Завершающая стадия процесса уплотнения заключается в объемном сжатии уплотненной, монолитизированной массы. Сложность и многообразие процессов, сопровождающих процесс уплотнения, не позволяют найти точную количественную зависимость, обобщающую на основе физических моделей деформирования поведение порошкообразных и гранулированных полимерных материалов при объемном сжатии. Для каждого типа полимерного материала аналитическая зависимость между плотностью ρ и давлением p находится опытным путем. Так, для пресс-порошка 03-010-02 эта зависимость была определена экспериментально (рис. 1.1). Мате-

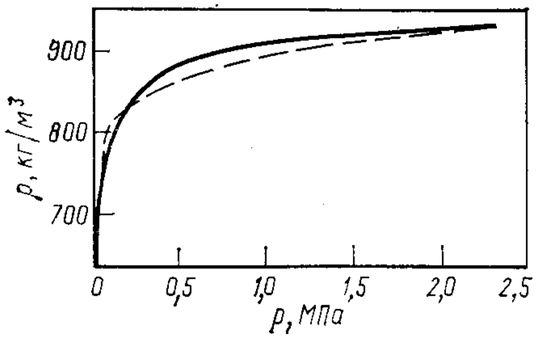


Рис. 1.1. Кривая сжимаемости композиции 03-010-02 при $T=295$ К (ρ — плотность). Сплошная кривая — экспериментальная, пунктирная кривая получена по уравнению (1.2) при $\rho_н=650$ кг/м³.

матическая обработка опытных данных привела к выражению для ρ (кг/м³)

$$\rho=\rho_н\left[1+\left(\frac{p}{A}\right)^{1/a_n}\right] \qquad (1.2)$$

где $\rho_н$ — насыпная плотность, кг/м³; p — давление, МПа; a_n и A — параметры ($a_n=5$; $A=145$ МПа).

При переработке материалов с малой насыпной плотностью (большим удельным объемом) и большим коэффициентом уплотнения имеют место низкая производительность и большие удельные энергозатраты в литьевых, экструзионных и валковых машинах и прессах. Это связано с тем, что при переработке таких материалов затрачивается дополнительная энергия и время на уплотнение полимера. Кроме того, в сырье с малой насыпной плотностью обычно содержится большое количество воздуха, ухудшающего теплопроводность материала, и, следовательно, увеличивается время и повышаются энергозатраты, необходимые для разогрева и пластикации материала.

Решение проблемы повышения производительности оборудования при работе с порошками и гранулятом малой насыпной плотности заключается в предварительном уплотнении сырья, например, в бункерном устройстве, оснащенном уплотняющим червяком-питателем. При использовании червяка-питателя достигается повышение насыпной плотности на 30—40%, улучшается равномерность питания оборудования и повышается его производительность.

1.1.3. Фрикционные свойства

Под действием внешней статической нагрузки в порошкообразном материале при упругом деформировании его частиц возникают реактивные напряжения, направленные нормально направлению сжимающей силы. В общем случае уплотнения зернистого материала такие напряжения анизотропны (неравны между собой по величине), т. е. $\sigma_{xx}\neq\sigma_{yy}\neq\sigma_{zz}$. Степень анизотропии нормальных напряжений зависит от размера и формы частиц, состояния их поверхности, от давления, влажности материала и т. д.

Нормальные напряжения, воздействуя на ограждающие материал поверхности — стенки бункера, желоба, матрицы, канала нарезки червяка, являются причиной возникновения на этих стенках так называемого бокового давления. Отношение бокового давления $p_б$ к внешнему давлению p характеризует степень анизотропии нормальных напряжений в материале и называется *коэффициентом бокового давления* k. В общем случае

$$k=\sigma_{ii}/\sigma_{jj} \qquad (1.3)$$

где σ_{ii} и σ_{jj} — нормальные напряжения.

Для одноосного напряженного состояния

$$\sigma_{ii}=-p_б; \qquad \sigma_{jj}=-p; \qquad k=p_б/p \qquad (1.4)$$

Коэффициент бокового давления является величиной переменной, зависящей от трения частиц друг о друга. При уплотнении, например, пресс-порошка типа 03-010-02 при давлении до 5 МПа значение $k=0{,}5\div0{,}6$, при давлении до 8—12 МПа значение k повышается до $0{,}6\div0{,}65$. Для гранулированного полиэтилена при $p=5$ МПа значение k достигает 0,45—0,5, для полистирола при $p=0{,}1$ МПа $k=0{,}5$ и при $p=1$ МПа $k=0{,}7$. Значение k для стеклонаполненных и асбонаполненных волокнитов может достигать 0,8—0,9.

Боковое давление оказывает влияние и на силу внешнего трения композиции. При перемещении зернистого материала относительно ограждающих поверхностей на контактирующей с ними поверхности материала возникают силы внешнего трения, направленные в сторону, обратную направлению переме-

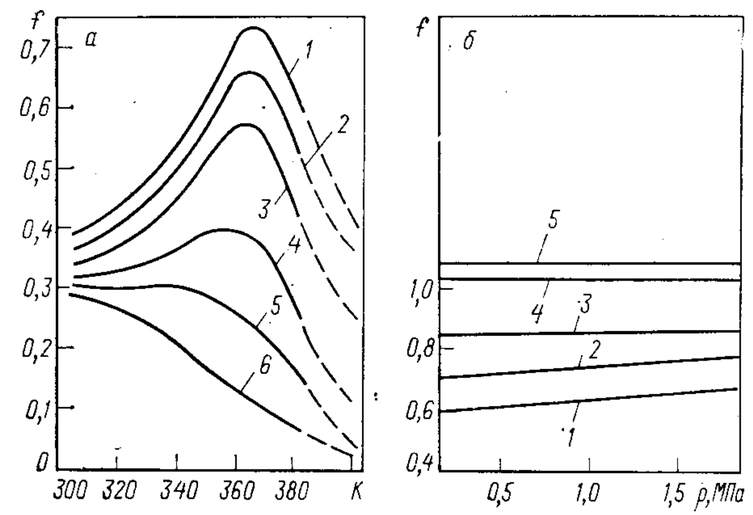


Рис. 1.2. Зависимость коэффициента трения f полиэтилена высокой плотности по стали от температуры при скорости скольжения 0,8 м/с и различных давлениях (*а*) (*1* — 0,25 МПа; *2* — 0,5; *3* — 1; *4* — 2; *5* — 4; *6* — 8 МПа) и пресс-материала 03-010-02 по стали от давления при $T=295$ К и различных скоростях скольжения (*б*) (*1* — 1,5 мм/с; *2* — 3; *3* — 5,9; *4* — 23; *5* — 36,5 мм/с).

щения. Величина силы трения пропорциональна силе бокового давления. Интенсивность силового взаимодействия перемещаемого материала с поверхностями рабочих органов оборудования определяется *коэффициентом трения* f между транспортируемым материалом и этими поверхностями. Коэффициент трения термопластичных полимеров зависит в значительной степени от давления и температуры и в меньшей степени — от скорости скольжения и шероховатости поверхности.

При этом температурная зависимость коэффициента трения при давлениях, меньших 4 МПа, имеет явно выраженный максимум в области температур перехода $T_с$ или $T_{пл}$ (см. разд. 1.2.1), объясняющийся проявлением начинающегося вязкого течения расплава в пристенном слое взамен сухого трения (рис. 1.2, *а*). При давлениях от 4 до 8 МПа для полиэтилена высокой плотности коэффициент трения независимо от скорости скольжения уменьшается с повышением температуры.

Коэффициент трения пресс-порошка слабо зависит от давления (до 2 МПа), оказываемого на материал; он является функцией скорости транспортирования, свойств композиции и состояния соприкасающихся поверхностей (рис. 1.2, *б*).

1.1.4. Теплофизические свойства

Определение теплофизических свойств является необходимым при расчете процессов нагревания полимерных материалов в пластикаторе, форме, термошкафу, генераторе, ТВЧ и процессов охлаждения отформованного изделия. Изменение физического состояния материала на различных стадиях технологического процесса влечет за собой и существенные изменения его теплофизических свойств. Теплофизические характеристики зависят от состояния материала, его плотности, влажности, размера частиц и их ориентации, степени пропитки наполнителя связующим и т. д.

Основными теплофизическими характеристиками материала при данных температуре и давлении являются *удельная теплоемкость* c, *коэффициент теплопроводности* λ, *плотность* ρ и *коэффициент температуропроводности* a, которые связаны между собой зависимостью

$$a = \lambda/(c\rho) \qquad (1.5)$$

Определение этих величин не регламентировано ГОСТом, однако имеется большое число методов их оценки, применяемых в лабораторной практике. Для изучения процессов нагревания — охлаждения полимерного материала на различных стадиях процесса переработки необходимо определение его теплофизических свойств в порошкообразном и таблетированном виде, а также в расплавленном и отвержденном состояниях.

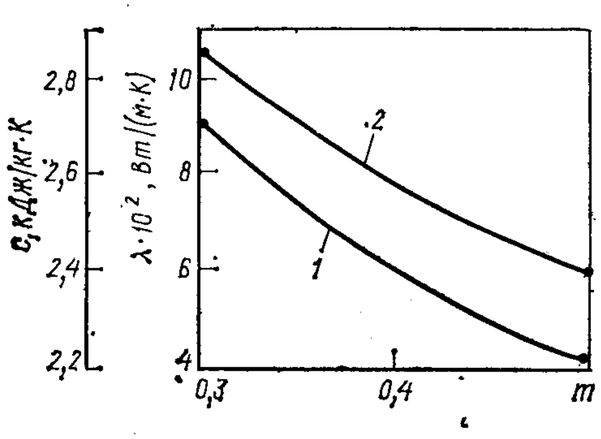


Рис. 1.3. Зависимость удельной теплоемкости c (*1*) и коэффициента теплопроводности λ (*2*) от пористости m для пресс-порошка 03-010-02.

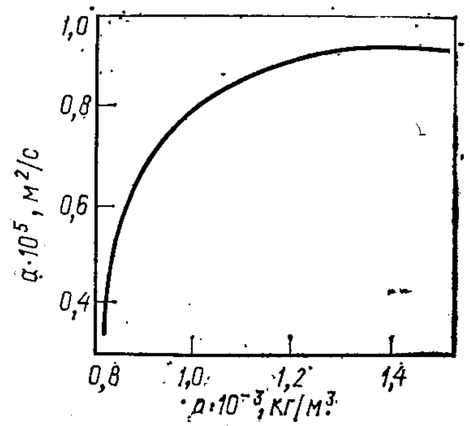


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента температуропроводности a от плотности ρ пресс-материала 03-010-02.

Теплофизические свойства пористых порошкообразных и гранулированных композиций в исходном состоянии характеризуют условия теплопередачи через двухкомпонентную систему, твердая фаза которой состоит из полимера, а газообразная — из воздуха. Характеристики порошкообразных материалов, полученные расчетным или экспериментальным путем, всегда являются величинами усредненными, приближенными, т. е. эффективными. Такая неопределенность связана со сложностью реальной структуры пористого тела, разнообразием способов контактирования друг с другом твердых частиц различной формы и размеров, различной ориентацией их по отношению к тепловому потоку. При этом эффективная теплопроводность в значительной степени зависит от теплопроводности газа, заполняющего поры, от размера частиц и полостей между ними, от пористости материала, а роль теплопроводности материала частиц (самого полимера) невелика.

Теплофизические характеристики полимерных материалов (порошков, гранул) зависят от пористости композиции m (т. е. от отношения объема пустот к общему объему) и от температуры. Например, эффективная теплоемкость c пресс-порошка 03-010-02 с увеличением пористости m уменьшается, как и коэффициент теплопроводности (рис. 1.3). Коэффициент температуропроводности a увеличивается с ростом насыпной плотности, сопровождающимся уменьшением пористости системы (рис. 1.4). С ростом температуры теплофизические характеристики c и λ имеют тенденцию к повышению. Например, коэффициент теплопроводности одного и того же пресс-порошка при повышении температуры от 293 до 473 К увеличивается с 0,12 Вт/(м·К) до 0,18 Вт/(м·К).

1.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ ПРИ ИХ ПЕРЕРАБОТКЕ

1.2.1. Физическое состояние полимера

Поведение полимерного материала в процессе переработки определяется прежде всего его агрегатным состоянием.

Известны три *агрегатных состояния* физического тела: твердое, жидкое и газообразное. Различия в агрегатных состояниях связаны с соотношением энергий межмолекулярного взаимодействия и теплового движения. В том случае, если энергия межмолекулярного взаимодействия превышает энергию теплового движения, тело остается твердым, в противном случае тело является газообразным. Жидкое состояние характеризуется промежуточным соотношением энергий. В области низких температур полимер ведет себя подобно твердому низкомолекулярному веществу, занимая определенный объем и оказывая сильное сопротивление изменению формы и объема под действием внешних сил, т. е. находится в твердом агрегатном состоянии. При нагревании за счет увеличения теплового движения сегментов молекул происходит переход в жидкое агрегатное состояние. Для этого состояния характерно наличие малой сжимаемости полимера и малого изменения формы под действием внешних сил. Газообразного состояния у полимеров не существует, поскольку они разлагаются при нагревании еще до того, как смог бы образоваться газ.

В термодинамике различают три *фазовых состояния* тела: твердое (кристаллическое), жидкое и газовое, отличающиеся друг от друга рядом термодинамических параметров. Твердому агрегатному состоянию полимера соответствуют два фазовых состояния: кристаллическое и аморфное (стеклообразное). Жидкому фазовому состоянию соответствуют два агрегатных состояния: твердое (стеклообразное) и жидкое (расплав). Полимер в жидком фазовом состоянии принято называть аморфным: для него характерно сохранение «ближнего порядка» в структуре макромолекул. Полимер в твердом фазовом состоянии всегда имеет кристаллическое строение («дальний порядок» в макромолекулярной структуре).

Аморфный полимер имеет три *физических состояния:* стеклообразное, высокоэластическое и вязкотекучее. Физическое состояние полимера зависит от температуры и молекулярной массы. Изучение физического состояния полимера проводят путем рассмотрения характера его деформаций, определения деформируемости в широкой области изменения температуры в условиях внешнего механического воздействия. Наиболее наглядными являются *термомеханические кривые,* показывающие зависимость деформации от температуры при постоянном напряжении и постоянном времени действия напряжения.

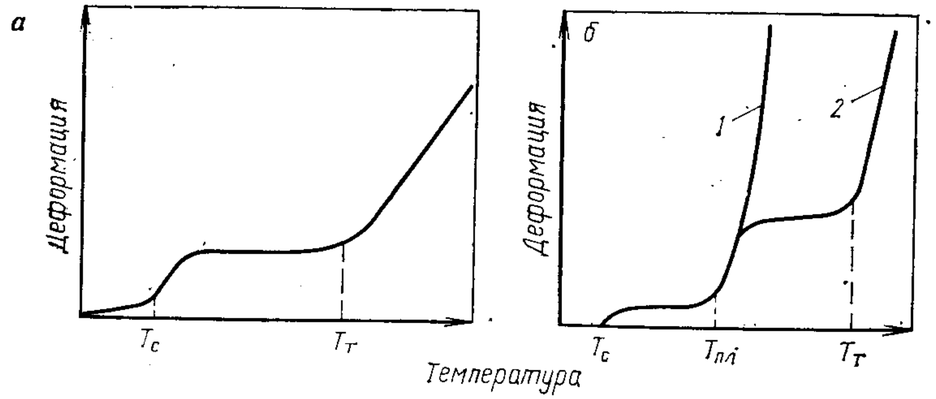


Рис. 1.5. Термомеханическая кривая для аморфного (*а*) и кристаллического (*б*) полимеров:
1 — высокая степень кристалличности; *2* — низкая степень кристалличности.

Характерная термомеханическая кривая аморфного полимера представлена на рис. 1.5, *а*. При низких температурах деформации малы и обратимы, что соответствует стеклообразному состоянию аморфного вещества. При дальнейшем повышении температуры выше $T_с$ (температуры стеклования) обнаруживается так называемое высокоэластическое состояние. Это состояние отличается наличием значительных обратимых деформаций. В области высокоэластичности обратимая деформация меняется с температурой незначительно, вплоть до переходной области, условно отмечаемой температурой текучести $T_т$. Вблизи температуры текучести происходит быстрый рост деформации за счет возникновения необратимого вязкого течения. Наличие высокоэластического состояния является отличительным признаком полимера, в котором проявляется специфическая особенность цепных полимерных молекул — гибкость. Температуры переходов $T_с$ и $T_т$ не являются точками, а определяются как средние температуры довольно протяженных переходных областей. Интервал температур, соответствующий высокоэластическому состоянию, зависит не только от типа аморфного полимера, но и от его молекулярной массы.

Для кристаллического полимера может быть также получена характеристика его физических состояний путем построения термомеханической кривой (рис. 1.5, *б*). Однако кристаллический полимер обладает значительно меньшей температурной областью высокоэластичности, чем аморфный, или она у него вовсе отсутствует. Температура перехода в вязкотекучее состояние (кривая *1*) или в высокоэластическое состояние (кривая *2*) называется температурой плавления $T_{пл}$. Наличие высокоэластических свойств у кристаллического полимера связано с его неполной кристалличностью. Температура перехода в вязкотекучее состояние для олигомерного связующего термореактивной композиции называется температурой размягчения $T_р$. Ее также определяют по термомеханическим кривым. Для фе-

нопластов и стеклонаполненных пресс-материалов температура размягчения находится в интервале 333—383 К (60—110 °С).

Большинство кристаллических и аморфных полимеров при обычной температуре являются жесткими материалами, некоторые полимеры (каучуки) в обычных условиях находятся в высокоэластическом состоянии. Используя метод термомеханических кривых, определяют температурную область переработки и применения полимерных материалов. Процесс формования изделий, т. е. придания полимеру требуемой формы под воздействием внешних факторов, осуществляется преимущественно при переводе материала в вязкотекучее состояние (литье под давлением, экструзия, прессование, каландрование). Лишь при пневмо- и вакуумформовании полимер переводится в высокоэластическое состояние.

1.2.2. Реакции отверждения (вулканизации)

По поведению при нагреве все полимерные материалы подразделяются на *термопластичные* и *термореактивные*. Первые при нагреве переходят в вязкотекучее состояние и могут находиться в этом состоянии при данной температуре неопределенно долго. При этом макромолекулы полимера сохраняют деформативность цепей и их способность скользить друг относительно друга. Вторые при нагреве и под воздействием веществ, называемых сшивающими агентами, приобретают ограниченную подвижность полимерных цепей; происходит поперечное сшивание макромолекул, образуются трехмерные сетчатые структуры. К полимерным материалам, приобретающим под воздействием тепла и сшивающих агентов трехмерную пространственную молекулярную структуру, относятся реактопласты и резиновые смеси. Реакции отверждения связующего реактопластов и вулканизации каучуков в резиновых смесях используют для фиксации формы готовых изделий и придания им прочности и жесткости.

Большое практическое значение имеет установление кинетических закономерностей реакции отверждения (вулканизации), т. е. реакции структурирования. Количественной оценкой степени протекания реакции может служить c_x — относительная концентрация вступившего в реакцию сшивающего агента (например, серы при вулканизации каучука). Экспериментально установлено, что реакции отверждения (вулканизации) могут быть отнесены к реакциям, проходящим в одну стадию, скорость которых зависит только от относительной концентрации сшивающего агента:

$$\frac{dc_x}{dt} = K(T)(1 - c_x)^{n_p} \qquad (1.6)$$

где t — время; $K(T) = K_0 \exp[-U_p/(RT)]$ — температурный коэффициент

(K_0 — постоянная, U_p — энергия активации реакции, R — универсальная газовая постоянная); n_p — порядок реакции.

Константы уравнения K_0, U_p, n_p определяются расчетным путем по экспериментально найденной зависимости $c_x(t)$ в любом температурно-временном режиме $T(t)$. Интегрированием (1.6) получают выражение для определения c_x при известной функции $T(t)$:

$$c_x = 1 - \left[(1 - c_0)^{1-n_p} + K_0 (n_p - 1) \int_0^t \frac{dt}{\exp \frac{U_p}{RT(t)}}\right]^{-\frac{1}{n_p - 1}} \qquad (1.7)$$

где c_0 — начальная степень отверждения, достигаемая в материале при его приготовлении.

Необходимым условием получения высококачественного изделия из термореактивного материала является достижение требуемой и максимально однородной по массе изделия конечной степени вулканизации (отверждения) $c_к$.

1.2.3. Термодеструкция

Под одновременным воздействием температуры, кислорода воздуха, света и механического усилия полимерные материалы претерпевают разнообразные химические превращения. К числу этих превращений относится и *термическая деструкция*, в результате которой происходит разрыв полимерных цепей с образованием свободных макрорадикалов, способных образовывать в результате вторичных реакций полимеры более низкой молекулярной массы. Деструкция полимеров может носить также термоокислительный, гидролитический и механохимический характер.

Переработка термопластичного полимера проводится только в интервале температур, лежащем между температурой $T_т$ (или $T_{пл}$) с одной стороны и температурой термического разложения $T_{тр}$ — с другой. Для расширения температурной области переработки выгодно повышать температуру $T_{тр}$ путем добавления так называемых стабилизаторов, которые подавляют реакции термического и термоокислительного распада. Температурно-временну́ю область переработки полимера, в которой исключаются процессы деструкции, определяют по зависимости периода термостабильности $t_т$ от температуры T. Эта область заштрихована на рис. 1.6. Она ограничена с одной стороны минимальной температурой переработки $T_{мин}$, близкой к $T_т$, а с другой стороны — максимальной температурой переработки $T_{макс}$. Для определения $T_{макс}$ по оси ординат откладывают время действия температуры переработки $t_д^*$ на материал в перерабатывающем оборудовании, равное 15 мин и из полученной точки проводят линию, параллельную оси абсцисс до

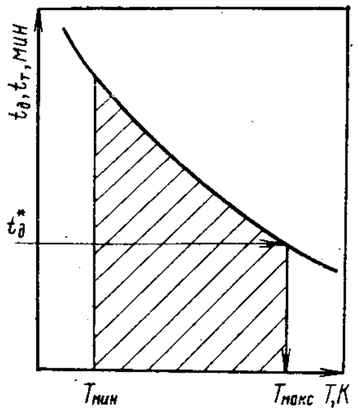


Рис. 1.6. Определение температурно-временной области переработки полимера ($t_т$ — период термостабильности, $t_д$ — время действия температуры переработки на материал в перерабатывающем оборудовании); $t^*_д = 15$ мин.

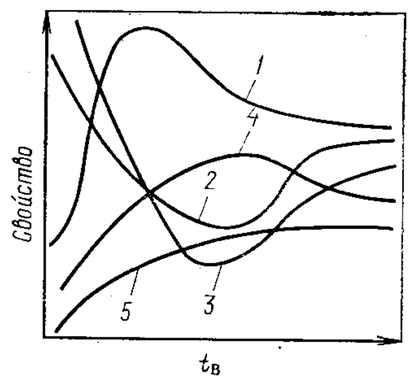


Рис. 1.7. Зависимость свойств натурального каучука от продолжительности вулканизации:

1 — разрушающее напряжение при растяжении; *2* — относительное удлинение при разрыве; *3* — набухание; *4* — эластичность; *5* — твердость.

пересечения с кривой $t_т = f(T)$. Абсцисса точки пересечения будет являться значением $T_{макс}$.

Вследствие того, что реакция отверждения (вулканизации) протекает при повышенной температуре, ей также сопутствует процесс термоокислительной деструкции. Это приводит к разрыву уже образовавшихся мостиков из сшивающих агентов, а также разрушению молекул каучука или связующего. В технологической практике этот процесс, противоположный структурированию, называется *реверсией* или *перевулканизацией.* Экспериментально установлено, что реакции структурирования (I) и реверсии (II) можно представить как две последовательно протекающие реакции порядка $n_р$ с различными константами скорости K_1 и K_2. При этом конечный продукт реакции I является исходным для реакции II. Совместное решение кинетических уравнений типа (1.6) для реакций I и II при $n_р = 1$ приводит к выражению для текущей суммарной степени протекания реакции c_x:

$$c_x = \frac{K_1}{K_2 - K_1} [\exp(-K_1 t) - \exp(-K_2 t)] \qquad (1.8)$$

Подобный подход к определению кинетических закономерностей протекания реакций структурирования — деструкции является в значительной степени упрощенным, однако он может быть использован на практике для определения зависимости $c_x(t)$, однозначно связанной с комплексом свойств материала. Эта связь является основой многих практических методов оценки технологических свойств материалов и расчета технологических режимов формования изделий.

Зависимость качества изделий от степени химических превращений определяется степенью отверждения (вулканизации) и однородностью ее по массе, а также степенью термической деструкции (реверсии). Качественная картина зависимости свойств натурального каучука от времени вулканизации $t_в$, однозначно связанного с величиной c_x, представлена на рис. 1.7. С ростом $t_в$ увеличиваются значения прочности, жесткости и твердости. После достижения максимума этих свойств (оптимума вулканизации) эти показатели снижаются с ростом $t_в$ вследствие развивающегося процесса деструкции. Деструкция приводит к разрушению трехмерной структуры, что иллюстрируется ростом набухаемости вулканизата.

Максимумы на кривых свойство — время вулканизации достигаются для различных свойств не одновременно, поэтому оптимальное значение $t_в$ не может быть однозначным. «Технический» оптимум, принятый на практике для установления времени вулканизации, соответствует достижению совокупности оптимальных свойств вулканизата для изделия конкретного назначения. Зависимости, подобные показанным на рис. 1.7 для резиновой смеси, были получены и для материалов на основе олигомерных связующих.

Следует отметить, что на практике критерием выбора величины $t_в$ для реактопластов служит не комплекс физико-механических свойств, а достижение изделием удовлетворительного внешнего вида, а также формоустойчивости. Поэтому, если изделия не эксплуатируются в условиях значительных нагрузок, процесс отверждения в формующем инструменте не доводят до конечной степени отверждения. Это предотвращает развитие термодеструкции материала и значительно интенсифицирует процесс переработки. Протекание в материале химических превращений оказывает существенное влияние не только на свойства готовых изделий, но и на технологические свойства сырья и в первую очередь — на реологические характеристики реактопластов и резин (см. разд. 1.3.4).

1.3. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

При переработке пластмасс и резиновых смесей исходный материал претерпевает ряд последовательных превращений, каждое из которых влияет на комплекс свойств конечного продукта — изделия. Эти превращения определяются изменением основных переменных параметров различных стадий процесса переработки: времени воздействия на материал, температуры и давления. Поступающий на переработку полимерный композиционный материал (или резиновая смесь) представляет собой труднодеформируемое тело, формование изделий из которого практически невозможно. Под влиянием переменных парамет-

ров процесса полимер переходит в состояние, в котором легко деформируется для последующего придания ему определенной формы, которая в дальнейшем должна быть зафиксирована. Этим состоянием является вязкотекучее состояние, которое может быть достигнуто тремя путями: 1) нагревом полимерного материала или олигомерного связующего; 2) использованием в качестве связующего жидкого олигомера; 3) введением растворителя — нового жидкого компонента.

Вязкотекучее состояние позволяет проводить формование изделия путем развития необратимой деформации течения. Установление закономерностей, характеризующих количественную связь между деформациями и напряжениями, возникающими под воздействием внешних сил на полимер, находящийся в вязкотекучем состоянии, т. е. его реологическое поведение, является существенно необходимым для научно обоснованной оценки формуемости — возможности получения изделия на данном оборудовании в каждом конкретном случае. Реологические свойства расплавов полимеров лежат в основе аналитического определения основных параметров технологического процесса переработки и конструктивных размеров рабочих органов перерабатывающего оборудования.

Перевод перерабатываемого материала в вязкотекучее состояние осуществляется в большинстве случаев за счет кондуктивного теплообмена, а также за счет диссипативных тепловыделений. Процесс формования и фиксации формы изделия сопровождается процессом кондуктивного теплообмена, а также выделением тепла за счет химических превращений в материале. Следовательно, для оценки энергетических затрат в процессах подготовки расплава полимера, его формования и придания готовому изделию формоустойчивости необходимо определение теплофизических свойств расплавов пластмасс и резиновых смесей.

1.3.1. Реологические свойства термопластов и резиновых смесей

При нагреве аморфных термопластичных материалов до температуры выше температуры стеклования T_c, а кристаллических материалов — выше температуры плавления $T_{пл}$ полимер получает способность к вязкому течению, т. е. к большим необратимым пластическим деформациям. Вместе с этим в полимере развиваются еще два вида деформаций: упругая и высокоэластическая. Одновременное развитие данных видов деформации приводит к появлению ряда специфических особенностей поведения расплава полимерного материала при его деформировании — аномальных по сравнению с поведением низкомолекулярных (ньютоновских) жидкостей.

Реологическое состояние материалов, относящихся к *ньютоновским* жидкостям, при одномерном сдвиговом течении

можно охарактеризовать уравнением

$$\tau = \eta_н \dot{\gamma} \qquad (1.9)$$

где τ — напряжение сдвига; $\eta_н$ — постоянная ньютоновская вязкость; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига.

Коэффициент $\eta_н$ является реологической характеристикой жидкости и при данной температуре не зависит от режима течения (интенсивности деформирования $\dot{\gamma}$).

Реологические свойства расплавов полимерных материалов лишь в области весьма малых напряжений сдвига могут характеризоваться постоянной ньютоновской вязкостью. В условиях установившегося течения расплав полимерного материала в большинстве случаев приобретает свойства *неньютоновских*, или *аномально-вязких*, жидкостей. Реологические свойства аномально-вязких жидкостей нельзя охарактеризовать постоянной величиной вязкости: она утрачивает значение константы из-за зависимости от условий деформирования. Формально связь между τ и $\dot{\gamma}$ для такой жидкости можно представить в виде

$$\eta(\dot{\gamma}) = f(T, \dot{\gamma}) = \tau/\dot{\gamma} \qquad (1.10)$$

где $\eta(\dot{\gamma})$ — эффективное значение вязкости.

Графическое изображение зависимостей (1.9) и (1.10), обычно называемое *кривыми течения*, представлено на рис. 1.8.

Для получения представления о реологических свойствах расплавов полимеров определяют экспериментальную кривую течения методами ротационной или капиллярной вискозимет-

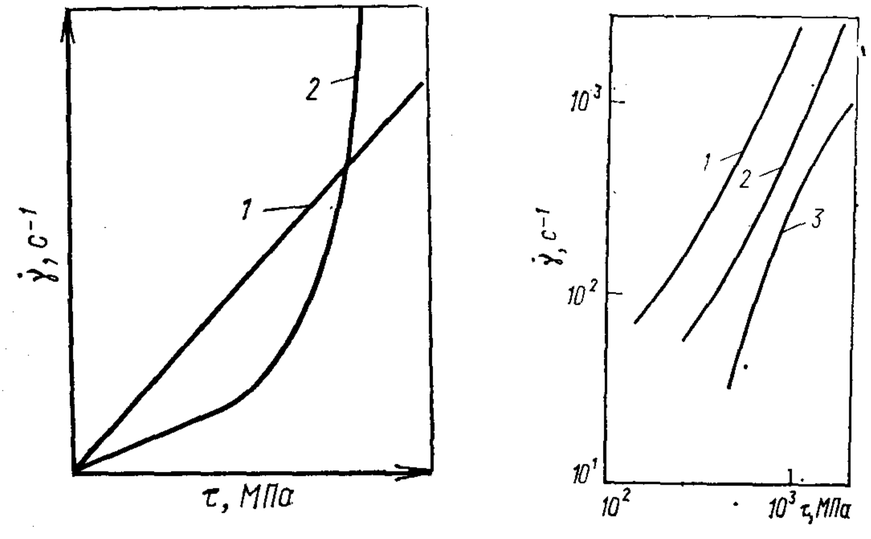


Рис. 1.8. Кривые течения ньютоновской (*1*) и неньютоновской (*2*) жидкостей.

Рис. 1.9. Кривые течения полиэтилена при 535 К (*1*), 477 К (*2*) и 423 К (*3*).

рии. На рис. 1.9 показаны кривые течения полиэтилена в логарифмических координатах.

Математическое описание экспериментальной кривой течения может быть представлено в виде степенного закона

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \tag{1.11}$$

где m — показатель консистенции; $n = \dfrac{\partial \lg\tau}{\partial \lg\dot{\gamma}}$ — индекс течения.

В зависимости от характера функции $\eta = f(T, \dot{\gamma})$ неньютоновские жидкости подразделяют на три группы: 1) бингамовские жидкости; 2) псевдопластичные жидкости; 3) дилатантные жидкости.

Бингамовские жидкости в состоянии покоя представляют собой тело, имеющее жесткую пространственную структуру. Эта структура может быть разрушена при деформировании после достижения определенного значения напряжения сдвига $\tau = \tau_т$, называемого пределом текучести. При $\tau > \tau_т$ система обнаруживает неньютоновское поведение. Для *псевдопластичных* жидкостей характерно отсутствие предела текучести и наличие постепенного уменьшения эффективной вязкости с ростом скорости сдвига. *Дилатантные* жидкости также не имеют предела текучести, а их эффективная вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига.

Эффективная вязкость, определяемая как соотношение τ и $\dot{\gamma}$ из выражений (1.9)—(1.11), может быть представлена в следующем виде:

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \tag{1.12}$$

Индекс течения n в (1.1) не является константой, а уменьшается с ростом скорости сдвига. Очевидно, что с помощью степенного закона невозможно описать всю кривую течения, однако отдельные ее участки могут быть с некоторой степенью приближения заменены отрезками прямых, тангенсы угла наклона которых представляют собой локальные значения индекса течения. Условно разбивая кривую течения на отрезки с определенным диапазоном скоростей сдвига, характерным для отдельной стадии процесса переработки, можно описать реологическое поведение, т. е. определить эффективную вязкость $\eta(\dot{\gamma})$, которая обнаруживается на каждой из этих стадий.

Из-за непостоянства индекса течения нельзя судить об эффективной вязкости по результатам испытаний в ограниченном диапазоне изменения $\dot{\gamma}$, так как это может привести к ошибочным результатам. Действительно, определяя $\eta(\dot{\gamma})$ в ограниченном диапазоне $\dot{\gamma}$ и механически перенося полученные данные на область более высоких или более низких $\dot{\gamma}$, можно допустить значительную ошибку. Отсюда очевидна неправомерность прогнозирования перерабатываемости полимерных материалов по данным испытаний в условиях, далеких от реализуемых на промышленном оборудовании.

Зависимость вязкости полимерных материалов от температуры весьма значительна и именно это обстоятельство предопределило использование предварительного подогрева полимера в различных методах переработки пластмасс. Разогрев термопласта и резиновой смеси понижает их вязкость и облегчает процессы формования изделий.

Общепринятой в настоящее время является аналитическая зависимость эффективной вязкости от интенсивности деформирования $\dot{\gamma}$ и температуры T, полученная с использованием уравнения Аррениуса в виде

$$\eta = m_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right)\dot{\gamma}^{n-1} \tag{1.13}$$

где m_0 — коэффициент, зависящий от природы жидкости.

Ниже приведены значения постоянных этого уравнения для полистирола марки ПСЭ-1 (ГОСТ 20282—74) и полиэтилена высокой плотности марки 20908-40 (ГОСТ 16337—77):

	$\dot{\gamma}$, с$^{-1}$	n	m_0, МПа/с^n	E, кДж/моль
ПС	10^1—10^2	0,404	$5{,}55\cdot10^{-8}$	47,3
ПЭВП	10^0—10^2	0,577	$3{,}59\cdot10^{-5}$	18,6

Экспериментально установлено, что термопласты и каучуки в чистом виде и в виде полимерной термопластичной композиции и резиновой смеси в состоянии расплава являются псевдопластичными жидкостями, реологическое поведение которых может быть описано зависимостью (1.13).

Как отмечалось, при деформировании расплавов термопластов и резиновых смесей в них развиваются не только необратимые, но и обратимые, упругие деформации. Вследствие этого при сдвиговом деформировании в материале возникают в направлении сдвига не только касательные τ, но и нормальные σ растягивающие напряжения; в направлении же, перпендикулярном направлению сдвига, появляются сжимающие нормальные напряжения. Механизм их возникновения можно представить, воспользовавшись схемой, показанной на рис. 1.10.

Пусть расплав достаточно долго находится между двумя параллельными пластинами *1* и *2* (см. рис. 1.10, *а*, поз. *1*), верхняя из которых перемещается в направлении x с постоянной скоростью. В расплаве непрерывно развивается деформация сдвига γ. Эта полная деформация γ равна сумме запасенной в

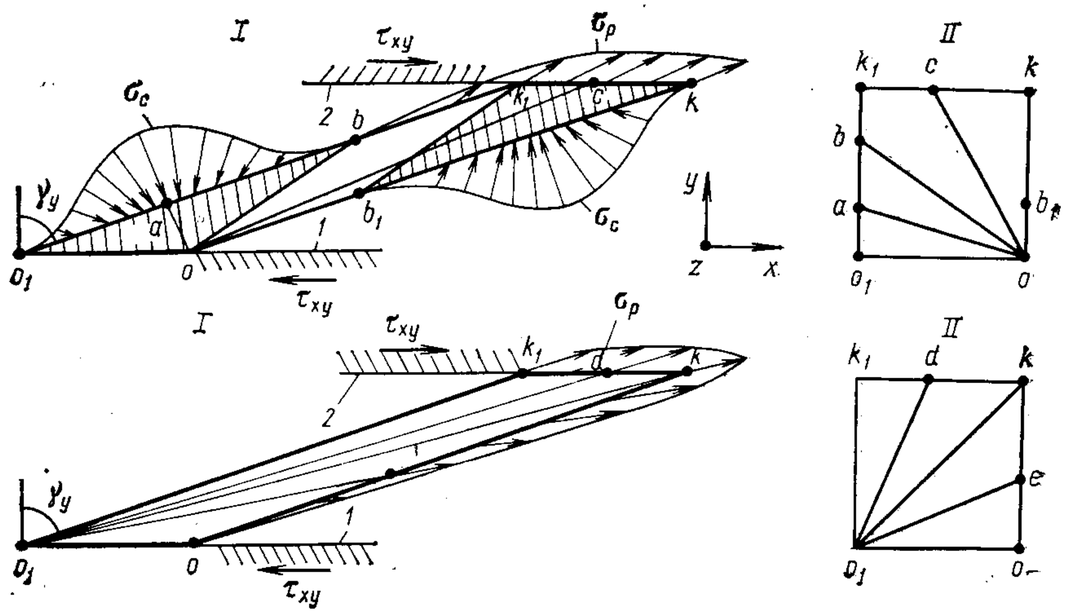


Рис. 1.10. Схема развития нормальных напряжений при сдвиге. Пояснения в тексте.

расплаве упругой деформации γ_y и возрастающей необратимой деформации $\gamma_н$:

$$\gamma(t) = \gamma_y + \gamma_н(t); \qquad \gamma_н = \dot{\gamma}t \tag{1.14}$$

где t — время деформирования; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига.

Если снять внешнее силовое воздействие τ_{xy} со стороны стенки *2* на материал, то упругая составляющая деформации γ_y исчезнет. В момент времени, непосредственно предшествующий снятию внешнего силового воздействия, мысленно выделим в потоке объем материала o_1k_1ko (см. рис. 1.10, *а*, поз. *I*), имеющий такую конфигурацию, которая после исчезновения упругой деформации сдвига γ_y обращается в куб (см. рис. 1.10, *а*, поз. *II*). В этом, свободном от напряжений, состоянии из точки *о* проведем несколько лучей: *oa, ob, oc*. Положение этих лучей в напряженном состоянии (до исчезновения упругой деформации сдвига) показано на поз. *I*. Как видно, длина луча *oa* в напряженном состоянии меньше, чем в ненапряженном. длина луча *ob* неизменна, а длина луча *oc* — больше.

Из этого ясно, что любой из лучей, заключенных между oo_1 и *ob*, удлиняется при исчезновении внешнего силового фактора. Если в процессе исчезновения деформации происходит удлинение, то это значит, что имела место деформация сжатия. Иными словами, при сдвиговом течении в направлениях, соответствующих лучам, заключенным между oo_1 и *ob*, развиваются упругие обратимые деформации сжатия. Возникновение их вызывает появление соответствующих напряжений сжатия σ_c.

Воздействию этих напряжений подвержен заштрихованный участок oo_1b выделенного объема.

В направлении лучей oo_1 и *ob* деформации отсутствуют, деформация сжатия в направлении луча *oa* максимальна. Отсюда очевиден вывод о том, что направление усредненного напряжения σ_c, действующего на участок oo_1b, практически совпадает с направлением луча *oa*.

Рассуждая таким же образом, нетрудно убедиться, что участок $bokk_1$ подвержен воздействию растягивающих напряжений σ_p направленных в среднем под углом γ_y по отношению к оси *y*. Далее, если подобные же лучи провести из точки k_1, противоположной точке *о*, то, рассуждая аналогично, можно выделить участок k_1b_1k (см. поз. *I*), также подверженный воздействию напряжений сжатия σ_c. Наконец, если провести ряд лучей из точки o_1 или противоположной ей точки *k* (см. рис. 1.10, *б*), то можно убедиться, что в направлениях всех этих лучей действуют напряжения растяжения σ_p; преимущественное их направление — под углом к оси *y*, несколько большим, чем γ_y.

При реальных напряжениях сдвига τ_{xy}, развивающихся в каналах рабочих органов перерабатывающего оборудования, упругие деформации γ_y достаточно велики. В этом случае направление максимальной деформации сжатия *oa* (см. рис. 1.10, *а*, поз. *I*) и, следовательно, направление σ_c практически совпадают с направлением оси *y*. Напряжения же σ_p оказываются направленными практически вдоль оси *x*.

Таким образом, приходим к выводу, что при сдвиговом деформировании вязкоупругих расплавов в направлении оси *x* возникают наряду с касательными напряжениями τ_{xy} нормальные напряжения растяжения σ_{xx} и напряжения сжатия σ_{yy}. Анализируя поведение выделенного объема материала в направлении оси *z* (перпендикулярно плоскости чертежа на рис. 1.10), можно показать, что и в этом направлении возникают нормальные напряжения σ_{zz}, отличные по величине от σ_{xx} и σ_{yy}.

В приведенных рассуждениях не учитывалось, что деформируемый материал может находиться под воздействием давления *p*. При этом сущность рассмотренных явлений остается неизменной независимо от того, имеется это давление *p* или оно отсутствует. Однако следует иметь в виду, что при наличии давления *p* полные нормальные напряжения σ_{ii} являются алгебраической суммой этого давления и тех нормальных напряжений, которые возникают по указанным причинам (последние обозначим σ'_{ii}):

$$\sigma_{ii} = -p + \sigma'_{ii} \tag{1.15}$$

Таким образом, полные напряжения оказываются зависящими как от давления *p*, так и от режима сдвигового деформирования. Однако разности полных напряжений σ_{xx}—σ_{yy} и

σ_{yy}—σ_{zz}, равные

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = -p + \sigma'_{xx} - (-p + \sigma'_{yy}) = \sigma'_{xx} - \sigma'_{yy} \qquad (1.16)$$

$$\sigma_{yy} - \sigma_{zz} = -p + \sigma'_{yy} - (-p + \sigma'_{zz}) = \sigma'_{yy} - \sigma'_{zz} \qquad (1.17)$$

не зависят от давления, поэтому именно их используют в качестве параметров, характеризующих реологическое поведение вязкоупругих жидкостей при сдвиге.

Чем больше напряжение τ_{xy}, тем больше вызванные им упругие деформации и соответствующие нормальные напряжения σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, а также первая и вторая их разности. Экспериментально установлено, что с ростом τ_{xy} первая и вторая разности напряжений возрастают почти пропорционально τ^2_{xy}. Величина τ_{xy} является функцией скорости сдвига $\dot{\gamma}$, например, в соответствии с реологическим уравнением в виде степенного закона (1.11). Очевидно, что и обе разности напряжений также должны быть степенными функциями $\dot{\gamma}$:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = m_1 \dot{\gamma}_{xy}^{n_1} \qquad (1.18)$$

причем $n_1 \approx 2n$. Из опытных данных, приведенных на рис. 1.11, видно, что уравнение (1.18) соответствует действительности. На рис. 1.12 приведены подобные данные для нескольких полимеров.

Вторая разность σ_{yy}—σ_{zz}, как показывают эксперименты, имеет отрицательный знак и связана с первой разностью соотношением

$$\sigma_{yy} - \sigma_{zz} = -\varepsilon\,(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \qquad (1.19)$$

$$\varepsilon\Big|_{10^2<\dot{\gamma}<10^3} = 0{,}3 \div 0{,}5$$

Деформирование расплава полимера при различных мето-

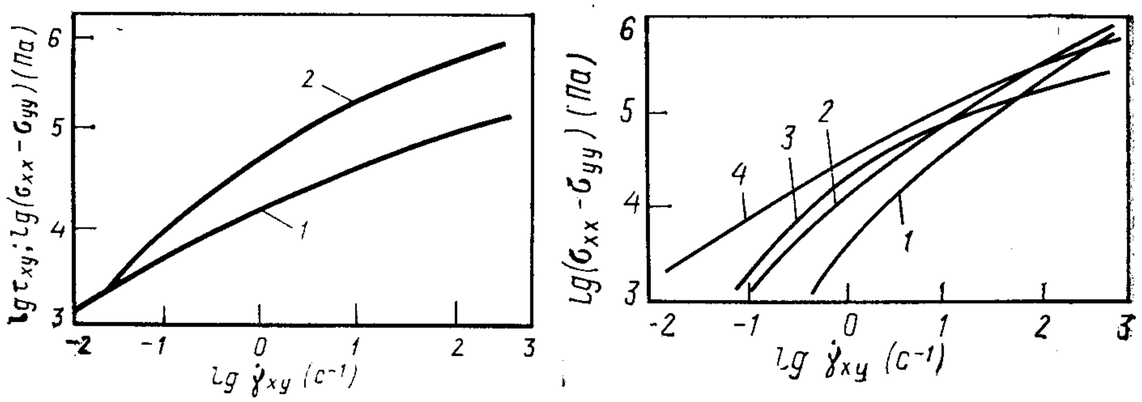
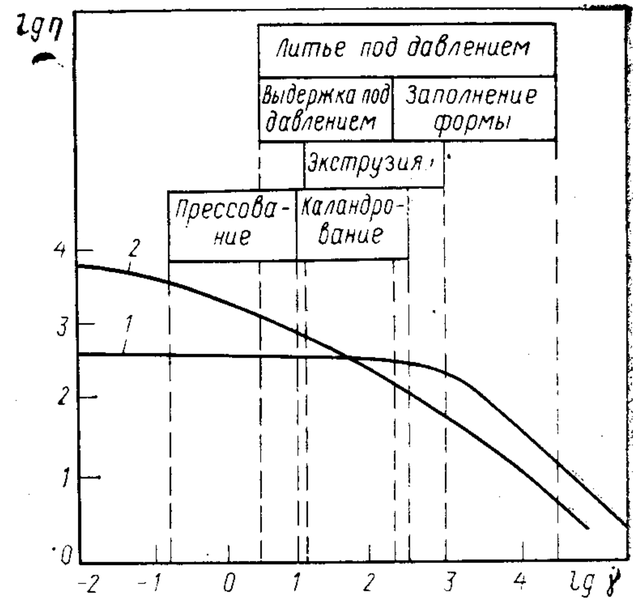


Рис. 1.11. Зависимость касательных (*1*) и первой разности нормальных (*2*) напряжений от скорости сдвига для полиэтилена высокой плотности при 200 °С.

Рис. 1.12. Зависимость первой разности нормальных напряжений от скорости сдвига при 200 °С:

1, *2* — полиэтилен высокой и низкой плотности соответственно; *3* — полипропилен; *4* — полистирол.

Рис. 1.13. Зависимость $\eta = f(\dot{\gamma})$. Пояснения в тексте.



дах переработки, а также на разных стадиях формования одним методом, происходит при различных скоростных параметрах. Кривые *1* и *2*, представленные на рис. 1.13, характеризуют изменение вязкости полимеров в зависимости от скоростей сдвига $\dot{\gamma}$, реализующихся при переработке этих материалов различными методами. Так, при переработке полимеров типа поликарбоната, полиамида и полиформальдегида (кривая *1*) можно отметить, что постоянное, близкое к ньютоновскому, значение вязкости расплава этих материалов характеризует процессы их деформирования при прессовании, каландровании, экструзии и при выдержке под давлением в процессе литья под давлением. Лишь на стадии заполнения формы при литье под давлением при $\dot{\gamma} > 10^3$ $с^{-1}$ наблюдается аномально-вязкое течение с убывающим значением вязкости. Для расплавов полимеров типа полиолефинов, полистирола, а также для резиновых смесей (кривая *2*) характер развития аномалии вязкости определяет интенсивное снижение вязкости при всех методах переработки.

1.3.2. Реологические свойства композиций на основе олигомерных связующих

Композиции на основе олигомерных связующих представляют собой высоконаполненные суспензии (большей частью грубодисперсные). Физико-химическое состояние расплавов этих материалов качественно отлично от состояния термопластов и резиновых смесей. Олигомерное связующее представляет собой низкомолекулярный продукт с вязкостью при температурах переработки в тысячи раз меньшей, чем вязкость резиновых смесей или термопластов. Высокая вязкость композиций на основе олигомерного связующего (реактопластов) обеспечивается в основном большой концентрацией наполнителя — древесной муки, асбеста, стекловолокна и т. д. Вязкость этой системы, представляющей собой высоконаполненную суспензию, определяется характером взаимодействия частиц наполнителя со связующим. Поэтому при деформировании такой системе присущи аномальные явления, обусловленные разрушением «каркаса»,

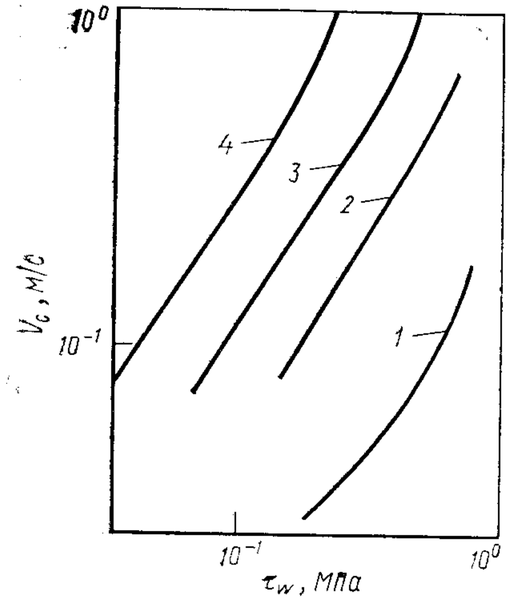


Рис. 1.14. Зависимость скорости пристенного скольжения V_c от напряжения сдвига на стенке τ_w для пресс-порошка 03-010-02 при различных температурах: *1* — 368 К; *2* — 393; *3* — 413; *4* — 433 К.

состоящего из соединенных друг с другом частиц наполнителя.

При изучении реологических свойств различных марок реактопластов в температурном диапазоне переработки и в широком диапазоне скоростей и напряжений сдвига было установлено, что при $\dot{\gamma} \leqslant 1$ $с^{-1}$ эти композиции представляют собой явно выраженную псевдопластичную жидкость, удовлетворительно подчиняющуюся степенному закону (1.11). При дальнейшем росте интенсивности деформирования $\dot{\gamma}$ в массе композиции происходит полный разрыв «каркаса», построенного из частиц наполнителя, с образованием узкого слоя, заполненного олигомерным связующим. При течении в каналах расплава композиции поверхность «внутреннего срыва» располагается у стенки канала, обусловливая явление «пристенного скольжения» и «пробковый» режим течения с плоским профилем скорости. Поэтому в области линейных скоростей заполнения $V > 1$ м/с практическое значение приобретают не кривые течения $\dot{\gamma}(\tau, T)$, а зависимость скорости пристенного скольжения V_c от напряжения сдвига на стенке и температуры $V_c = f(\tau_w, T)$ (рис. 1.14), которая может быть представлена в виде:

$$\tau_w = k_c V_c^s; \qquad k_c = k_0 \exp(b/T) \tag{1.20}$$

где k_0, b, s — константы; τ_w — напряжение скольжения на стенке; значения постоянных уравнения пристенного скольжения для композиции 03-010-02 (ГОСТ 5689—73) равны: $k_0 = 0{,}158$ Н·с^n/м$^{n+2}$, $b = 4908$ К, $s = 0{,}536$.

Для определения вязкостных свойств расплавов термопластов, реактопластов и резиновых смесей применяется ряд методов, например стандартизованный в СССР метод определения показателя текучести расплава (ПТР) на капиллярном вискозиметре ИИРТ, а также оценка текучести путем заполнения расплавов канала определенной формы и геометрических размеров (пресс-форма Рашига, спиральный канал литьевой формы). Однако эти характеристики реологического поведения материала позволяют лишь косвенно судить о вязкостных свойствах и их применение ограничено только одним методом переработки. Количественное сопоставление реологических свойств различных видов материалов в одинаковых или разных температурно-деформационных условиях переработки и оценка их перерабатываемости возможны только при установлении характеристики реологического поведения расплава в виде зависимостей (1.11) и (1.13) методами ротационной или капиллярной вискозиметрии.

1.3.3. Уравнение состояния

Объемное поведение полимерных систем, в которых не протекают химические реакции, может быть представлено *уравнением состояния*

$$v = v(p, T) \tag{1.21}$$

где v — удельный объем; p — давление; T — абсолютная температура.

Аналитической формой записи уравнения состояния, справедливой практически для всех термопластов и ненаполненных каучуков, является модифицированное уравнение Ван-дер-Ваальса

$$(p + \alpha_0)(v - b) = RT/M \tag{1.22}$$

где α_0, b, R, M — коэффициенты, которые могут быть интерпретированы следующим образом: α_0 — «внутреннее» давление, обусловленное силами межмолекулярного притяжения; b — собственный объем молекул; R — универсальная газовая постоянная; M — молекулярная масса структурной единицы.

Значения α_0, b, M практически не зависят от температуры и давления. Изменение объема полимера может происходить при постоянном давлении или постоянной температуре. Такие изменения характеризуются коэффициентом сжимаемости $\varkappa = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T$ и термическим коэффициентом линейного расширения $\lambda_p = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$. Значения α_0, b, M, $\varkappa$, λ_p приводятся в справочниках. Например, для ПЭВП марки 1004—002 (ГОСТ 16337—77) значения постоянных равны: $\alpha_0 = 677$ МПа, $b = 1{,}11 \cdot 10^2$ м/кг, $M = 32$ кг/кмоль, $\varkappa = 2 \cdot 10^{-4}$ МПа$^{-1}$ (при p до 60 МПа), $\lambda_p = 2{,}1 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$.

Для наполненных материалов (реактопластов и резиновых смесей) наблюдается значительное влияние на вид уравнения (1.22) содержания наполнителя. Экспериментально установлено, что для наполненных каучуков значение удельного объема смеси v_c в (1.22) зависит от содержания наполнителя по линейному закону:

$$v_c = (1 - z)\, v_к + v_н$$

где $v_к$ и $v_н$ — удельные объемы каучука и наполнителя; z — содержание наполнителя в смеси, масс. ч.

Коэффициент M для смеси (M_c) также зависит от соотношения массовых долей наполнителя $q_н$ и каучука $q_к$:

$$M_c = M(1 + q_н/q_к)$$

Константа b для смеси ($b_с$) равна

$$b_с = b - z\,(b - v_н)$$

Для реактопластов подобных экспериментальных данных не получено, однако установлено, что по сравнению с каучуковыми композициями реактопласты имеют значительно меньшую сжимаемость (коэффициент $\varkappa$). Для изотермического сжатия получено эмпирическое уравнение состояния композиции 03-010-02 в следующей простой форме:

$$p = \varkappa\,(\rho - \rho/\rho_0) \qquad (1.23)$$

где ρ и ρ_0 — текущее и начальное значения плотности.

Значение $\varkappa$ оказалось практически не зависящим от температуры в интервале 353—453 К и равным $4\cdot10^{-3}$—$5\cdot10^{-3}$ МПа $^{-1}$.

1.3.4. Зависимость реологических свойств реактопластов и резиновых смесей от степени химических превращений

Реактопласты и резиновые смеси на протяжении всего процесса их переработки испытывают температурные и деформационные воздействия, которые сопровождаются протеканием реакции отверждения (вулканизации). Свойства полимера при фиксированных параметрах процесса переработки (давлении, температуре, интенсивности деформирования) являются однозначной функцией степени протекания реакции c_x. Степень протекания реакции оказывается одним из тех независимых параметров, которые определяют комплекс технологических свойств расплавов этих материалов, в частности, эффективную вязкость $\eta(\dot\gamma)$ и удельный объем v.

Образование трехмерной структуры в реактопластах и резиновых смесях при переходе материала из вязкотекучего состояния в твердое приводит к изменению вязкости, которая по истечении определенного промежутка времени, т. е. по достижении определенной степени протекания реакции, начинает интенсивно возрастать. Этот промежуток времени принято называть *временем плато вязкости, временем вязкотекучего состояния* или *временем подвулканизации*. Время плато вязкости существенно зависит от температуры, уменьшаясь с ее ростом в соответствии с формулой

$$t^* = t_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right) \qquad (1.24)$$

где t_0, u, R — константы.

Большое практическое значение для определения времени t^* имеет установление однозначной связи между этим временем и вполне определенным значением степени отверждения c_x^* (см. разд. 1.2.2), соответствующим исчерпанию времени

плато вязкости. Значение c_x^* для различных видов полимерных материалов может достигать 0,8—0,85.

Представим зависимость (1.7) в виде

$$\frac{1}{(1-n_р)\,K_0}\left[(1-c_0)^{1-n_р} - (1-c_x)^{1-n_р}\right] = \int_0^t \exp\left[-\frac{U}{RT\,(t)}\right] dt = I \qquad (1.25)$$

Из уравнения (1.25) следует, что его левая часть, содержащая величину c_x и постоянные для данной композиции характеристики $n_р$, K_0, c_0, однозначно определяет величину I независимо от температурно-временного пути проведения отверждения, т. е. от вида функции $T(t)$. Следовательно, подставив в (1.25) вместо c_x величину c_x^*, получаем значение $I = I^*$, равное

$$I^* = \int_0^{t^*} \exp\left[-\frac{U}{RT\,(t)}\right] dt$$

Для определения t^* по параметру I^* построим последовательно кривые $T(t)$ для реального процесса нагрева материала (рис. 1.15, *а*), функцию $\exp\left[-\frac{U}{RT(t)}\right] = f(t)$ (рис. 1.15, *б*) и путем графического интегрирования этой кривой — кривую $I = f(t)$ (рис. 1.15, *в*). Вычислив по уравнению (1.25) (его левой части) значение I^* при известном c_x^* определяем по кривой, показанной на рис. 1.15, *в*, искомое значение t^*.

В частном случае изотермического нагрева

$$I^* = t^* \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \qquad (1.26)$$

По методике, аналогичной вычислению отрезка времени t^*, однозначно связанного с величиной c_x^*, можно определить и период времени отверждения материала t_0, который практически завершается при достижении в расплаве конечной степени протекания реакции отверждения (вулканизации) $c_к$. Величина $c_к$ может быть определена экспериментальным путем и, например, для новолачных термореактивных материалов составляет 0,92. Подставив в уравнение (1.25) вместо c_x^* значение $c_к$ и определив новое значение критерия $I = I_к$, вычисляем графическим методом t_0.

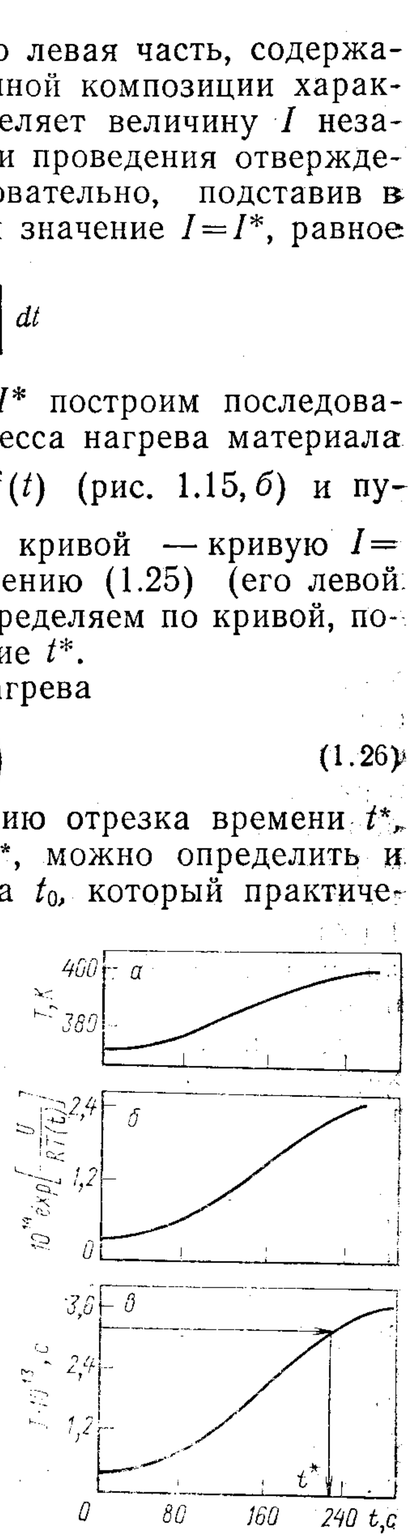


Рис. 1.15. Пример определения времени плато вязкости t^* по известному значению параметра I^* для резиновой смеси на основе натурального каучука; $U = 85$ кДж/моль. Пояснения в тексте.

Зависимость вязкости реактопластов и резиновых смесей от степени протекания реакции отверждения (вулканизации) во всем температурном интервале ее протекания может быть описана соотношением вида

$$\eta(T, c_x) = m_0(c_x) \exp \frac{E(c_x)}{RT} \qquad (1.27)$$

Уравнение (1.27) совместно с (1.7) дает полную информацию о поведении термореактивных материалов и резиновых смесей в процессах их переработки в изотермических режимах. Определение функции $T(t)$ в сложных неизотермических режимах и экспериментально найденные функции $m_0(c_x)$ и $E(c_x)$ позволяют отыскать зависимость значения вязкости от предшествующего температурно-временного воздействия.

Уравнение состояния в условиях протекания реакции отверждения (вулканизации) может быть представлено в следующем виде:

$$v = v(p, T, c_x) \qquad (1.28)$$

Конкретный вид этого уравнения находится экспериментально путем определения степени развития усадки в зависимости от степени отверждения (вулканизации).

1.3.5. Теплофизические свойства

Характер движения потока полимерного материала в рабочих органах оборудования и формующего инструмента в значительной степени зависит от теплофизических свойств полимера в расплавленном состоянии. При этом важнейшее значение приобретают данные о зависимости теплофизических свойств полимера — коэффициента температуропроводности a, коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоемкости c (см. разд. 1.1.4) — от температуры, поскольку процесс плавления материала и транспортирования расплава сопровождается значительным нагревом исходной композиции.

Для кристаллических и аморфных полимерных материалов характер изменения теплофизических характеристик с ростом температуры различен. При достижении температурной области фазового перехода на кривых зависимости $c(T)$ наблюдается характерный скачок (рис. 1.16), после чего удельная теплоемкость быстро снижается до величины, превышающей, однако, удельную теплоемкость твердого полимера. Величина этого пика пропорциональна содержанию кристаллической фазы в полимере, т. е. степени кристалличности. Для аморфного полимера в отсутствие химических превращений (деструкции, отверждения) удельная теплоемкость расплава линейно возрастает с повышением температуры.

Зависимость коэффициента теплопроводности λ для аморфных полимеров от температуры описывается непрерывной кри-

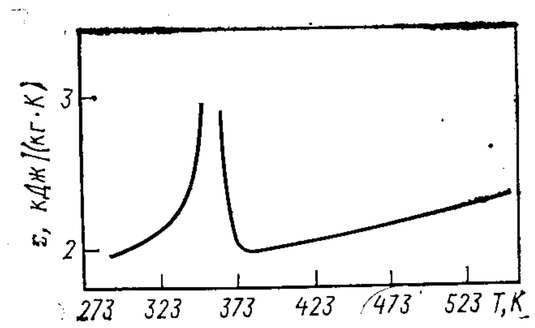


Рис. 1.16. Температурная зависимость теплоемкости c для полиэтилена низкой плотности.

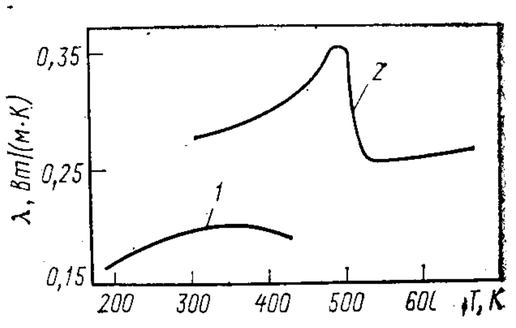


Рис. 1.17. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности λ:
1 — аморфный полимер (полиметилметакрилат); *2* — кристаллический полимер (полибутилентерефталат).

вой с точкой излома вблизи температуры стеклования T_c. Коэффициент теплопроводности полимеров в кристаллическом состоянии значительно выше, чем в аморфном, причем при температуре плавления кристаллической фазы $T_{пл}$ коэффициент теплопроводности падает, а затем остается практически постоянным или проявляет слабую зависимость от температуры (рис. 1.17).

Коэффициент теплопроводности полимера существенно зависит от молекулярной массы, химической природы полимера и наличия в нем добавок (наполнителей, пластификаторов), от давления расплава.

Часто в реальных процессах переработки полимеров изменение удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности λ при изменении температуры переработки невелико: отклонение от среднего значения в этом интервале не превышает 12—15%. Причем совокупное изменение λ, c и ρ таково, что коэффициент температуропроводности $a = \lambda/(c\rho)$ оказывается зависящим от температуры много меньше, чем составляющие.

Подобное заключение можно сделать для большинства композиций кристаллических и аморфных полимеров, резиновых смесей и реактопластов. Это позволяет при решении инженерных задач пренебрегать зависимостью теплофизических характеристик этих материалов от температуры.

Ориентация частиц наполнителя при переработке композиционных полимерных материалов оказывает влияние на коэффициент теплопроводности. Так, значение λ реактопластов со стекловолокнистым наполнителем в зависимости от ориентации наполнителя может изменяться на 30—40%.

Удельная теплоемкость c и коэффициент теплопроводности λ зависят от давления. С повышением давления c уменьшается, достигая минимума при определенном давлении. Величина λ с повышением давления увеличивается.

При протекании в реактопластах (резиновых смесях) реакции отверждения (вулканизации) принципиально изменяется их молекулярное строение. Однако, несмотря на это, теплофизические свойства исходных веществ и продуктов реакции различаются незначительно.

1.3.6. Адгезионные свойства

Исследование адгезии термопластов и реактопластов к поверхностям рабочих органов формующего инструмента, оснастки и арматуры имеет существенное значение при проектировании устройств для выталкивания и съема готовых изделий. Адгезионную способность оценивают по адгезионной прочности, определяемой отношением силы, преодолеваемой при одновременном отрыве полимера от всей площади контакта, к площади контакта. Разрушающая нагрузка при этом может быть приложена в направлении, параллельном плоскости контакта поверхностей, или перпендикулярном ей. На адгезионную прочность оказывают влияние чистота обработки металлической поверхности, наличие в ней защитных покрытий, смазки, тип связующего в композиции, а также технологические параметры процесса переработки.

Для некоторых термореактивных пресс-материалов значение адгезионной прочности следующее:

Пресс-материал	Адгезионная прочность, МПа
03-010-02	0,17—06
Э2-330-02	0,05—0,037
$С_п$1-343-02	0,068—0,59

При увеличении времени отверждения пресс-материала 03-010-02 с 4 до 20 мин адгезионная прочность его возрастает с 0,32 до 0,55 МПа. При повышенной адгезионной прочности пресс-изделия и отливки при выталкивании из формы могут повреждаться. Например, для фенопластов достижение адгезионной прочности 0,4—0,5 МПа делает невозможным удаление отвержденного изделия без повреждения.

ГЛАВА 2

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ РЕАКТОПЛАСТОВ К ПРЕССОВАНИЮ

2.1. ТРЕБОВАНИЯ К СОСТОЯНИЮ МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО ЗАГРУЗКЕ В ПРЕСС-ФОРМУ

Перерабатываемые методом горячего компрессионного прессования порошкообразные и волокнистые термореактивные материалы перед операцией прессования формуются в заготовки (полуфабрикаты) правильной геометрической формы — таблетки или брикеты, однородные по форме, размерам и массе. Целью таблетирования реактопластов является удовлетворение следующих требований к сырьевому материалу, поступающему в пресс-форму для последующего нагрева и прессования: высокая плотность материала, малый объем воздушных включений (пор), низкое содержание пылеобразной фракции.

Использование таблетированных реактопластов улучшает условия проведения нагрева материала до температуры переработки, так как уменьшение объема воздушных включений увеличивает его теплопроводность. При этом существенно сокращаются объемы загрузочных камер пресс-форм. Дозирование по объему или массе заменяется более простым и удобным — штучным. Применение таблеток снижает содержание пыли в производственных помещениях, благодаря чему улучшаются условия труда. С помощью предварительного таблетирования интенсифицируется технологический процесс, повышается производительность прессового оборудования, улучшается качество изделий, уменьшаются потери, снижаются расходы на хранение и транспортирование сырья.

Способность материала спрессовываться в компактную таблетку под действием сжимающего усилия определяет *таблетируемость* — важное технологические свойства сырья. Таблетируемость зависит от многих факторов: гранулометрического состава, влажности и температуры материала, наличия смазочных добавок, параметров процесса таблетирования и т. д. В каждом конкретном случае предъявляются особые требования и к самим таблеткам. Они должны обладать достаточной прочностью и не изменять свою форму и геометрические параметры при ударных и вибрационных воздействиях различного рода, сопровождающих транспортирование и загрузку таблеток в бункерные устройства и загрузочные камеры пресс-форм. Таблетки, изготавливаемые из пресс-материалов, обычно имеют цилиндрическую форму с плоскими или полусферическими основаниями. Находят применение таблетки (брикеты) в форме параллелепипеда.

Таблетирование осуществляют без подогрева материала путем его прессования в специализированных прессах-автоматах и на автоматических роторных линиях.

2.2. СПОСОБЫ ТАБЛЕТИРОВАНИЯ

Технологический процесс таблетирования реактопластов включает следующие основные операции (рис. 2.1): дозирование, прессование, выталкивание и транспортирование таблеток.

Дозирование — отмеривание или отвешивание определенного количества (дозы) материала и перемещение его в полость матрицы. Наиболее распространено объемное дозирование, т. е. отделение дозы путем заполнения определенного объема. Этот способ дозирования высокопроизводителен, конструкция объемного дозатора проста и надежна, удобна в обслужи-

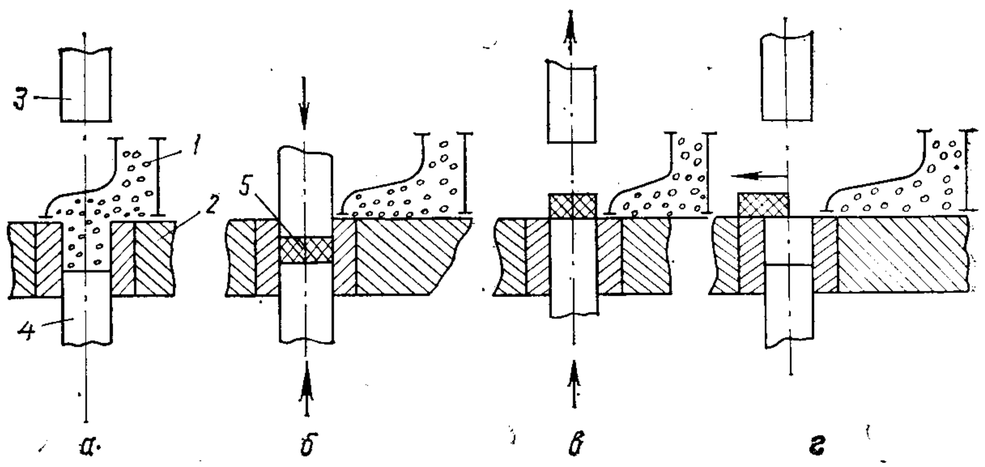


Рис. 2.1. Операции процесса таблетирования:
а — дозирование; *б* — прессование; *в* — выталкивание; *г* — транспортирование таблеток; *1* — бункер; *2* — матрица; *3* — верхний пуансон; *4* — нижний пуансон; *5* — таблетка.

вании. Недостатком объемного дозирования является малая точность дозирования, которая приводит к получению неоднородных по плотности таблеток. Дозирование по массе нашло применение при производстве индивидуальных, особо стабильных по массе изделий, а также при таблетировании волокнистых материалов. Дозирование по массе отличается невысокой производительностью, сложностью конструкции применяемого оборудования и его обслуживания.

Дозирование плохосыпучих и волокнистых материалов, имеющих склонность к слеживанию и сводообразованию, осложняется необходимостью оснащения бункерных и питающих устройств системой принудительной подачи материала — ворошителями-питателями.

Прессование — основная операция процесса таблетирования — заключается в уплотнении приготовленной дозы материала в замкнутом объеме. Прессование осуществляется с помощью пуансонов, перемещающихся в матрице. В зависимости от способа приложения усилия прессования таблетирование бывает односторонним и двухсторонним. При одностороннем прессовании (рис. 2.2, *а*) относительно матрицы перемещается только верхний пуансон *1*. При этом усилие прессования $P_в$ на верхнем пуансоне *1* и усилие $P_н$ на нижнем пуансоне *2* связаны соотношением

$$P_в = P_н + \sum R_т$$

где $R_т$ — равнодействующая сил трения, распределенных по боковой поверхности прессуемого изделия.

Снижение усилия прессования, передаваемого на материал, за счет внешнего трения по высоте прессуемого изделия в направлении от пуансона *1* к пуансону *2* уменьшает плотность и прочность таблетки в этом же направлении.

При двухстороннем прессовании (рис. 2.2, *б*) оба пуансона являются прессующими и создают одинаковое давление на верхней и нижней поверхности таблеток. При двухстороннем прессовании

$$P_в = P_н \qquad (2.2)$$

Вариантом конструктивного оформления процесса двухстороннего прессования является использование так называемой «плавающей матрицы» (рис. 2.2, *в*), имеющей возможность перемещаться в осевом направлении. При применении «плавающей матрицы» возникающие при прессовании силы трения действуют не только на таблетку, но и на пружину *3*, перемещая матрицу в сторону движения прессующего пуансона. В этом случае

$$P_в = P_н + T_п \qquad (2.3)$$

где $T_п$ — усилие, которое необходимо затратить на сжатие пружины.

Ввиду того, что $T_п$ составляет пренебрежимо малую часть от $P_в$, получим

$$P_в \approx P_н \qquad (2.4)$$

что справедливо для двухстороннего прессования.

Важной задачей при установлении технологического режима таблетирования является выбор давления прессования. Этим параметром в значительной степени определяется качество таблетки: ее механическая прочность, постоянство геометрических размеров, отсутствие трещин и внешних дефектов. Механическая прочность таблетки является функцией ее плотности, которая в свою очередь зависит от давления прессования

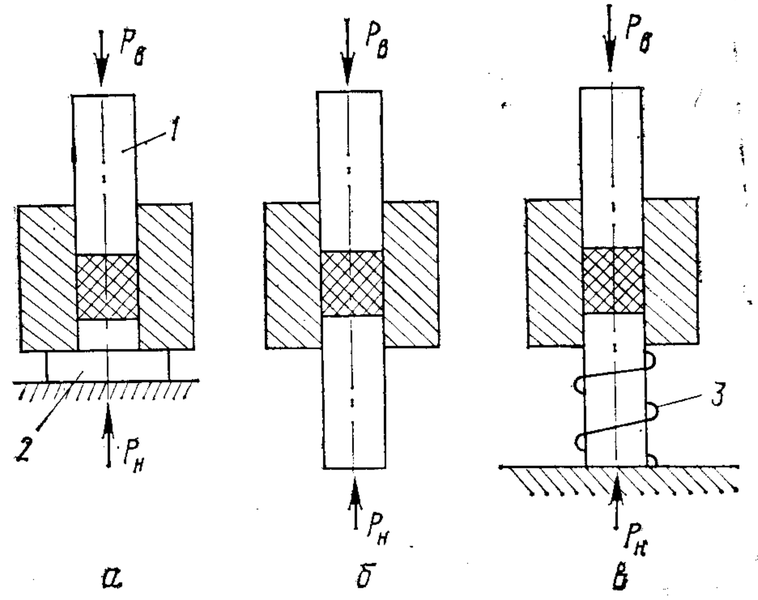


Рис. 2.2. Схемы прессования при таблетировании:
а — одностороннее; *б* — двухстороннее; *в* — с «плавающей» матрицей; *1* — верхний пуансон; *2* — нижний пуансон; *3* — пружина.

(разд. 1.1.2). Полученные опытным путем данные свидетельствуют о том, что при достижении значения давления прессования $p_п^*$, равного для фенопластов 75—125, а для стекловолокнитов 250—300 МПа, дальнейшего существенного увеличения плотности, а следовательно, и прочности таблетки не происходит. Выбор величины давления прессования, реализуемого при таблетировании, зависит также и от природы перерабатываемого материала, его температуры, влажности, наличия смазывающих добавок, скорости прессования.

Усилие таблетирования выбирается из условия необходимости достижения в таблетке минимального значения давления прессования $p_{мин}=p_п^*$ в наименее прочном слое таблетки. При односторонней схеме прессования этот слой располагается у нижнего пуансона, а при двухсторонней схеме прессования — в среднем (нейтральном) сечении.

Давление прессования $p_п$ по схеме одностороннего таблетирования определяется по формуле

$$p_п = p_{мин} + (4h_т/d_т)\,\tau_т \qquad (2.5)$$

где $h_т$ и $d_т$ — высота и диаметр таблетки соответственно; $\tau_т$ — удельная сила трения на боковой поверхности таблетки, она может быть найдена приближенно по соотношению $\tau_т=(0{,}25\div0{,}35)\ p_п$.

Для схемы двухстороннего таблетирования формула (2.5) видоизменяется следующим образом:

$$p_п = p_{мин} + (2h_т/d_т)\,\tau_т \qquad (2.6)$$

Определив давление прессования $p_п$, можно перейти к вычислению плотности материала в таблетке $\rho_т$ по формуле типа (1.2) и затем получить значение коэффициента уплотнения материала $k_у=\rho_т/\rho_н$. От степени уплотнения таблетируемого сырья $k_у$ зависит выбор конструктивных параметров узла таблетирования: хода пуансона, объема матрицы. Приравнивая массу порции пресс-порошка $g_п=\rho_н v_0$ к массе таблетки $g_т=\rho_т v_т$ (где v_0 и $v_т$ — объемы полости матрицы и таблетки соответственно) и выразив $v_0=(\pi d^2_т/4)H_0$ и $v_т=(\pi d^2_т/4)h_т$, получаем, что $k_у=H_0/h_т$. Задаваясь далее значением $d_т$, определяем $h_т$ и высоту полости матрицы H_0. Ход пуансона $l_п$ при схеме одностороннего таблетирования равен $l_п=H_0-h_т$; при схеме двухстороннего таблетирования ход каждого из пуансонов равен $l_п=(H_0-h_т)/2$.

Для определения необходимого *усилия таблетирования* P может быть использована формула

$$P=(\pi d_т^2/4)\,p_п \qquad (2.7)$$

Выталкивание — удаление таблетки из матрицы — осуществляется обычно одним из пуансонов, выполнявших прессование. Усилие выталкивания зависит от сил остаточного бокового давления, действующих в форме после снятия давления прессования. При этом усилие на выталкивающем пуансоне $P_в$ равно силе внешнего трения $T_в$ таблетки о стенки матрицы

$$P_в = T_в = \pi d_т h_т k p_{по} f \qquad (2.8)$$

где $d_т$ и $h_т$ — диаметр и высота таблетки; k — коэффициент бокового давления; $p_{по}$ — остаточное давление прессования $[p_{по}\approx(0{,}15\div0{,}20)p_п]$; f — коэффициент трения.

Транспортирование (сбрасывание) готовых таблеток осуществляется, как правило, механическим устройством. Обычно операция совмещается по времени с дозированием сырья.

Для изготовления таблеток из сыпучих порошкообразных полимерных материалов используются различные таблеточные машины — автоматы, которые можно классифицировать по ряду признаков. Таблеточные машины могут различаться: по виду привода (механические и гидравлические); по способу прессования (с одно- и двухсторонним прессованием, с «плавающей» матрицей); по характеру движения таблетируемого материала (с периодическим и непрерывным движением перерабатываемого объекта).

В большинстве случаев для таблетирования используются эксцентриковые (кривошипные), роторные и гидравлические машины. Эти автоматы, согласно ГОСТ 8200—80, могут быть охарактеризованы основным параметром — усилием прессования, которое в современных таблеточных машинах может достигать 1000 кН.

2.3. ЭКСЦЕНТРИКОВЫЕ ТАБЛЕТОЧНЫЕ МАШИНЫ

2.3.1. Конструкция

Эксцентриковые (кривошипные) таблеточные машины применяются для изготовления стабильных по массе таблеток диаметром 12—100 мм и высотой 15—200 мм при усилии прессования от 2 до 500 кН. Эти машины, являющиеся автоматами с периодическим перемещением обрабатываемого объекта, относятся в большинстве случаев к агрегатам рычажного типа вертикального исполнения с односторонним прессованием пресс-порошка.

Конструкция одной из наиболее распространенных таблеточных машин этого типа с усилием прессования 120 кН представлена на рис. 2.3. На станине *1* смонтирован привод и механизмы трансмиссии, дозирования, а также выталкивания. От электродвигателя, расположенного в нижней части станины, через ременную передачу вращение передается шкиву *22*, зубчатым колесам *16*, *24* и главному валу *19*. Главный вал, оснащенный кривошипом (эксцентриком) *11* и кулачками *15* и *17*, приводит в движение все механизмы, выполняющие технологические операции.

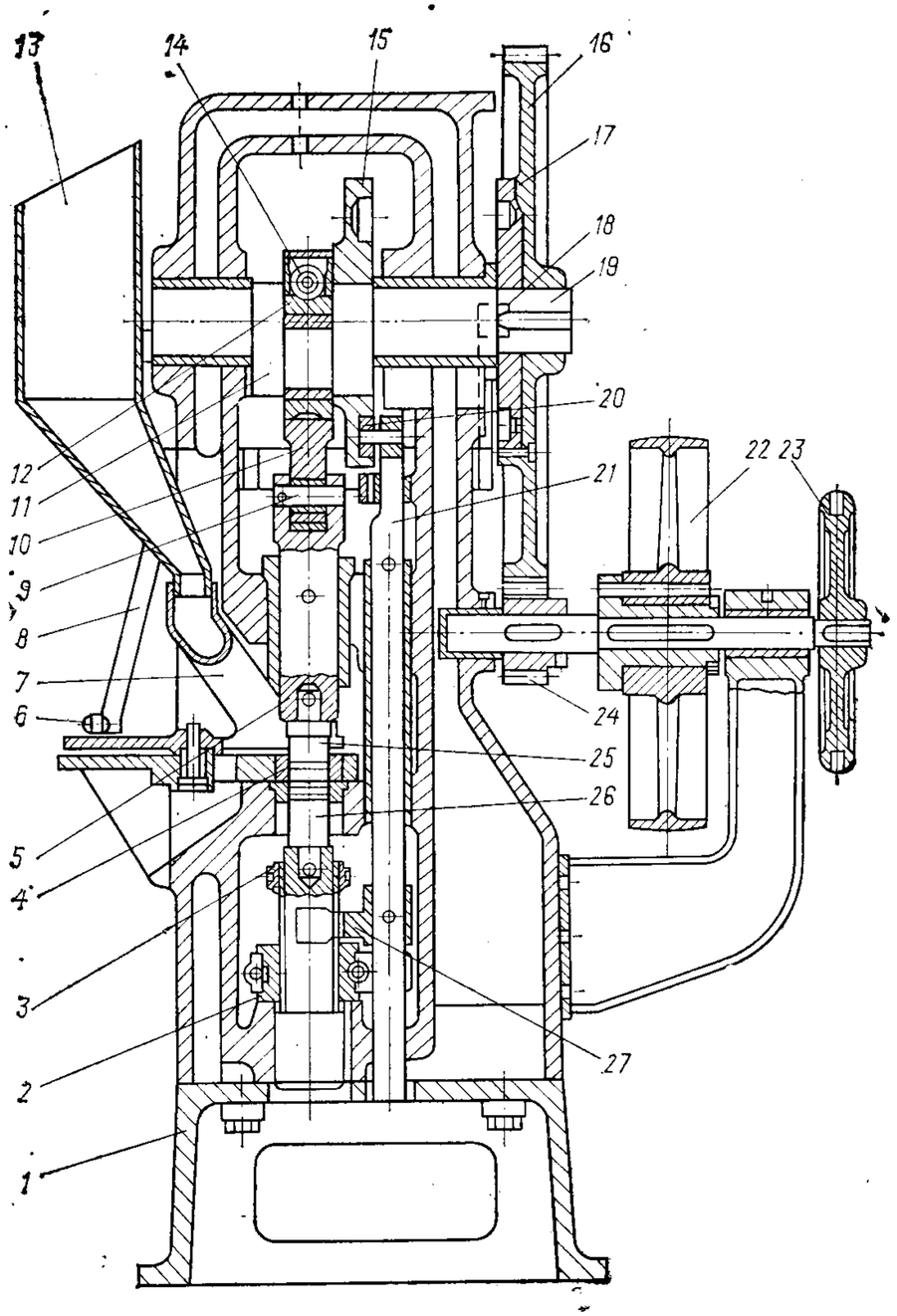


Рис. 2.3. Эксцентриковая таблеточная машина:
1 — станина; *2, 3* — гайки; *4* — матрица; *5* — ползун; *6* — серьга; *7* — ковш; *8* — рычаг; *9* — ось; *10* — шатун; *11* — кривошип (эксцентрик); *12* — червячное колесо; *13* — бункер; *14* — червяк; *15, 17* — кулачки; *16, 24* — зубчатые колеса; *18, 20* — ролики; *19* — главный вал; *21* — штанга; *22* — шкив; *23* — маховик; *25, 26* — пуансоны; *27* — вилка.

Механизм прессования представляет собой кривошипно-шатунную конструкцию, преобразующую вращательное движение вала в возвратно-поступательное движение ползуна *5* с укрепленным на нем верхним прессующим пуансоном *25*. Регулирование глубины захода пуансона *25* в матрицу *4* осуществляется изменением длины шатуна *10*. С этой целью червяк *14* вводится в зацепление с червячным колесом *12*, являющимся эксцентриковой втулкой. Поворотом эксцентриковой втулки при вра-

щении червяка достигается изменение расстояния от оси кривошипа *11* до оси пальца ползуна *9*.

Регулированием рабочего хода прессующего пуансона *25* достигается и изменение давления прессования, передаваемого таблетируемому материалу. Нижний (выталкивающий) пуансон *26* во время прессования посредством гайки *2* опирается на корпус машины. Выталкивание готовой таблетки проводится возвратно-поступательным движением пуансона *26*, приводимого в действие дисковым кулачком *15* через ролик *20*, штангу *21* и вилку *27*. Гайки *2* и *3* регулируют ход выталкивателя.

Механизм дозирования таблетируемого материала представляет собой бункер *13* с загрузочным ковшом *7*, который при помощи дискового кулачка *17*, ролика *18*, рычага *8* и серьги *6* поворачивается на некоторый угол вокруг вертикальной оси. Ковш *7* при повороте своей нижней кромкой скользит по поверхности рабочего стола, перекрывая отверстие матрицы, и дозирует порошок, возвращаясь затем в исходное положение. Маховик *23* используется для ручного проворачивания главного вала *19*. Операция сталкивания готовой таблетки совмещена в данной конструкции по времени с дозированием порошка.

2.3.2. Циклограмма работы

Механизмы эксцентриковой таблеточной машины, выполняющие технологические операции прессования, выталкивания и дозирования, находятся во взаимной связи, определяемой последовательностью операций технологического цикла изготовления таблеток. Для проверки взаимной согласованности этих операций, обеспечивающей совместную работу исполнительных механизмов, и анализа положения рабочих органов относительно друг друга в различные моменты времени технологического цикла используется цикловая диаграмма работы машины (циклограмма). Общая циклограмма машины строится путем совмещения циклограмм отдельных исполнительных механизмов. При этом принимается во внимание взаимное расположение ведущих звеньев этих механизмов на приводном валу машины.

Применительно к эксцентриковой таблеточной машине вертикального типа будем считать основным цикловым механизмом механизм прессования, исходное положение которого — крайнее верхнее положение ползуна с прессующим пуансоном. Два других исполнительных механизма начнут свою работу после поворота кривошипа на соответствующие фазовые углы φ_1 и φ_2. На циклограмме (рис. 2.4) представлены все операции технологического цикла таблетирования, выполненные последовательно или совмещенные по времени в зависимости от угла поворота главного (приводного) вала машины α.

Как видно из анализа совмещения диаграмм перемещения рабочих органов машины, значительная часть цикла работы

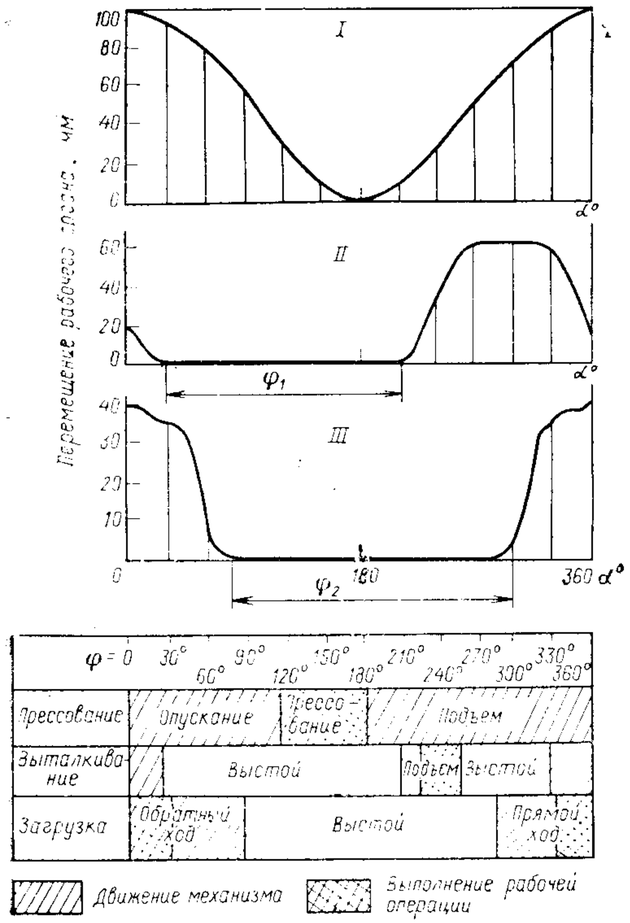


Рис. 2.4. Циклограмма работы эксцентриковой таблеточной машины с усилием прессования 120 кН:

I — механизм прессования; *II* — механизм выталкивания; *III* — механизм загрузки.

Пояснения в тексте.

состоит из несовмещенных по времени операций. В машине данной конструкции большая часть цикла тратится на холостые перемещения.

При проектировании кинематической схемы исполнительных механизмов агрегата путем анализа их совмещенных циклограмм необходимо добиваться отсутствия взаимного перемещения верхнего (прессующего) и нижнего (выталкивающего) пуансонов во время операции прессования таблетки. Следует также обеспечить завершение операции выталкивания таблетки к моменту начала ее сталкивания загрузочным башмаком и т. д.

Штучная производительность эксцентриковых машин $Q_{тэ}$ (шт./ч) может быть определена по формуле

$$Q_{тэ} = 60 k_э N \qquad (2.9)$$

где $k_э$ — число гнезд в пресс-инструменте; N — частота вращения главного вала, об/мин.

По штучной производительности может быть найдена массовая производительность $G_{тэ}$ (кг/ч)

$$G_{тэ} = 0{,}001 Q_{тэ} g_т \qquad (2.10)$$

где $g_т$ — масса таблетки, г.

2.3.3. Силовой расчет и определение мощности привода

В конструкции эксцентриковой таблеточной машины расчету на прочность подлежат те детали, которые воспринимают усилия, передаваемые с рабочих органов исполнительных механизмов — прессующего и выталкивающего пуансонов. Определение усилий, действующих в звеньях кривошипно-шатунного механизма прессования, а также в звеньях вспомогательных механизмов выталкивания и загрузки, необходимо и для расчета коэффициента полезного действия агрегата, выбора подшипников и т. д.

Рассмотрим в качестве примера силовой расчет механизма прессования. На звенья этого механизма действуют силы полезного сопротивления (усилие прессования), тяжести, инерции и трения в кинематических парах. В связи с тем, что ускорения движения звеньев незначительны, силами инерции можно пренебречь и силовой расчет механизма проводить как статический. Задача определения реакций в кинематических парах решается с помощью схемы механизма прессования, представленной на рис. 2.5, *а*. Рассматривая механизм прессования как плоский, введем ряд обозначений: $P_п$ — усилие прессования; P_{12} — реакция кривошипа *1* на шатун *2*; P_{23} — реакция шатуна *2* на ползун *3*; P_{03} — реакция направляющей на ползун *3*. Будем рассматривать случай, когда конструкция поступательной кинематической пары исключает возможность возникновения перекоса ползуна в направляющей.

Наличие трения в поступательной кинематической паре ползун — направляющая и во вращательных кинематических парах — шарнирах приводит к смещению реакций: в первом случае — на угол трения $\varphi = \operatorname{arctg} f$ в сторону, обратную направлению относительной скорости пары; во втором случае — на величину радиуса круга трения $\rho_r = f r_ц$ (где $r_ц$ — радиус цапфы, f — коэффициент трения). Для данной задачи радиус трения для цапфы B составляет $\rho_{rB} = f r_B$, для цапфы C равен $\rho_{rC} = f r_C$ (рис. 2.5, *а*). Реакции $P_{12} = P_{23}$ оказываются направленными касательно к кругам трения, построенным для точек B и C, а реакция P_{03} отклонена от нормали на угол трения φ.

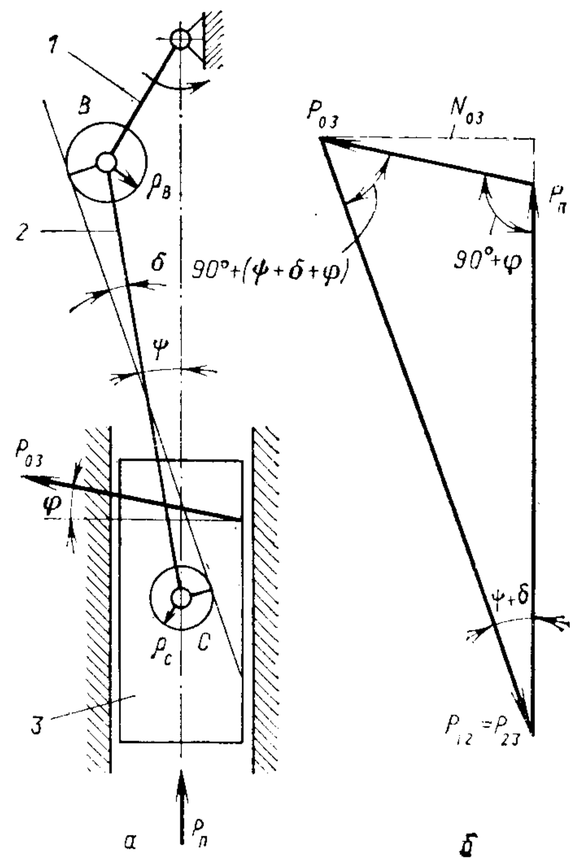


Рис. 2.5. Схема кривошипно-шатунного механизма прессования (*а*) и план сил, действующих на ползун (*б*):

1 — кривошип; *2* — шатун; *3* — ползун.

Пояснения в тексте.

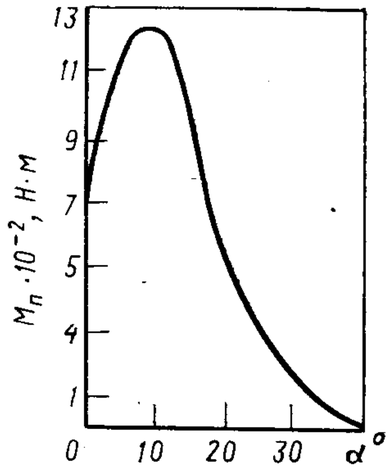


Рис. 2.6. Изменение приведенного к главному валу момента сил сопротивления звеньев механизма прессования $M_п$ эксцентриковой таблеточной машины с усилием прессования 120 кН в зависимости от угла поворота главного вала α.

Построив план сил для ползуна (рис. 2.5, *б*), получаем:

$$P_{12} = P_{23} \frac{\cos\varphi}{\cos(\psi + \delta + \varphi)} P_п \qquad (2.11)$$

$$P_{03} = \frac{\sin(\varphi + \delta)}{\cos(\psi + \delta + \varphi)} P_п \qquad (2.12)$$

Для нормальной составляющей N_{03} реакции P_{03} может быть предложено выражение

$$N_{03} = \frac{\sin(\varphi + \delta)\cos\varphi}{\cos(\psi + \delta + \varphi)} P_п \qquad (2.13)$$

Угол δ может быть определен из очевидных геометрических соотношений:

$$\delta = \arcsin\left(f \frac{r_B + r_C}{l}\right) \qquad (2.14)$$

где l — длина звена *2*.

Определив реакции P_{12}, P_{23} и N_{03}, можно проводить прочностной расчет эксцентрика, кривошипа, ползуна и шарнирных соединений.

Выбор мощности электродвигателя основан на построении диаграммы моментов, приведенных к главному валу машины, от сил сопротивления, приложенных ко всем звеньям механизмов машины. На рис. 2.6 в качестве примера представлена диаграмма изменения приведенного к главному валу момента сил сопротивления звеньев $M_п$ механизма прессования эксцентриковой машины с усилием прессования 120 кН в зависимости от угла поворота главного вала α. Наибольшее значение момента соответствует крайнему нижнему положению ползуна.

Номинальный момент электродвигателя $M_н$ (Н·м) может быть рассчитан с помощью диаграммы приведенных моментов от всех механизмов машины $M_п$ по формуле

$$M_н = 1{,}2 \frac{\int_0^{2\pi} M_п d\alpha}{2\pi\eta i} \qquad (2.15)$$

где 1,2 — коэффициент запаса; η — к. п. д. привода; i — передаточное отношение привода.

При известной площади диаграммы приведенных моментов $F_п$ формула (2.15) приобретает вид

$$M_н = 1{,}2 \frac{F_п \mu_M \mu_\alpha}{2\pi\eta i} \qquad (2.16)$$

где μ_M и μ_α — масштабные коэффициенты.

Требуемая номинальная мощность электродвигателя $W_н$ (кВт) может быть приближенно определена по формуле

$$W_н = M_н N_c / 97{,}5 \qquad (2.17)$$

где N_c — частота вращения синхронного электродвигателя.

Как видно из рис. 2.6, на диаграмме приведенных моментов сил сопротивления эксцентриковых таблеточных машин имеется резкий скачок. Поэтому при конструировании этих машин возникает необходимость установки маховика в кинематической цепи привода. Наличие маховика позволяет уменьшить колебания угловой скорости главного вала и снизить установочную мощность электродвигателя.

2.4. РОТАЦИОННЫЕ ТАБЛЕТОЧНЫЕ МАШИНЫ

Ротационные таблеточные машины предназначены для массового изготовления таблеток из пластических масс и отличаются высокой штучной производительностью. В этих машинах процесс таблетирования осуществляется одновременно в нескольких комплектах пресс-инструмента при их непрерывном перемещении вокруг вертикальной оси вместе с рабочим столом — ротором. В каждом из комплектов пресс-инструмента происходит таблетирование по схеме двухстороннего прессования. Пресс-инструмент состоит из матрицы и двух пуансонов, причем матрица неподвижно укреплена на роторе, а пуансоны перемещаются вдоль оси, параллельной оси вращения ротора.

Возвратно-поступательное движение пуансонов, обеспечивающее реализацию различных операций цикла таблетирования (загрузка — прессование — выталкивание — выгрузка), в ротационных машинах обеспечивается при помощи неподвижных цилиндрических копиров (кулачков). По копирам перемещаются (скользят или катятся) головки ползунов, связанные с рабочими прессующими пуансонами.

Наиболее распространенной таблеточной машиной ротационного типа является машина МТ-3А (рис. 2.7), предназначенная для изготовления таблеток из термореактивных материалов с усилием таблетирования до 90 кН. Внутри литой станины *1* расположены электродвигатель, фрикционная муфта, зубчатый и червячный редукторы. Неподвижные плиты *2* и *10* связаны между собой колоннами *11*, образуя при этом жесткую конструкцию, воспринимающую усилие прессования. Червячное колесо приводит во вращение главный вал *12* с укреп-

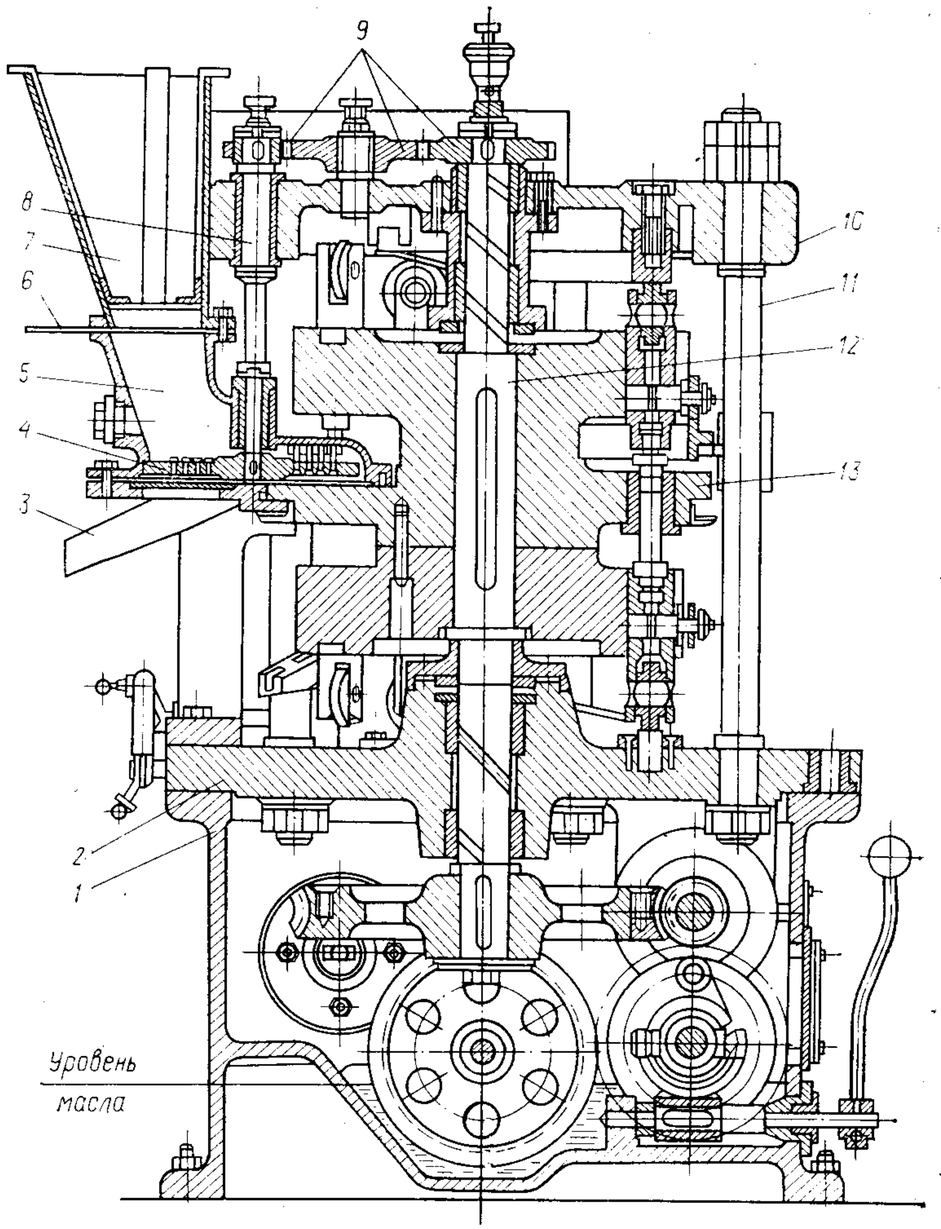


Рис. 2.7. Ротационная таблеточная машина МТ-3А:
1 — станина; *2*, *10* — неподвижные плиты; *3* — перфорированный лоток; *4* — ворошитель; *5* — приемник; *6* — заслонка; *7* — бункер-питатель; *8* — вал ворошителя; *9* — зубчатая передача; *11* — колонна; *12* — главный вал; *13* — ротор.

ленным на нем ротором *13*. Пресс-порошок поступает на таблетирование из бункера-питателя *7*, через заслонку *6* в приемник *5*. Ворошитель *4*, приводимый в действие путем вращения вала *8* с помощью зубчатой передачи *9*, препятствует слеживанию пресс-порошка и нарушению питания ввиду его переуплотнения.

По окружности ротора *13* расположены равномерно пятнадцать комплектов пресс-инструмента, каждый из которых состоит из матрицы и двух пуансонов. Перемещаясь вместе с ротором, пуансоны приобретают возвратно-поступательное дви-

жение за счет набегания роликов-ползунов на неподвижные копиры (кулачки). Отпрессованные таблетки удаляются по перфорированному лотку *3* в приемник.

С целью обеспечения постоянства плотности и прочности таблеток таблеточная машина оснащена стабилизатором усилия прессования пружинного типа. Это устройство служит для предохранения машины от перегрузки и поломки в результате попадания в матрицу посторонних предметов.

Последовательность выполнения технологических операций цикла таблетирования на ротационной таблеточной машине показана на рис. 2.8, где представлены развернутые по окружности кулачки, приводящие в действие верхние и нижние ползуны прессующих пуансонов. Порошок поступает из приемника *1* в матрицу *2*, глубина заполнения которой регулируется нижним пуансоном. Ползун *3* нижнего пуансона опирается с помощью ролика на дозирующий копир *4*, имеющий регулятор дозирования *5*. Кулачок *6* служит для перемещения вниз нижнего пуансона.

Прессование начинается после опускания вниз верхнего пуансона под действием собственного веса ползуна *7*. Совместное воздействие копиров *8* и *9* на ролики ползунов приводит к прессованию таблетки между торцами пуансонов. Клинья *10*

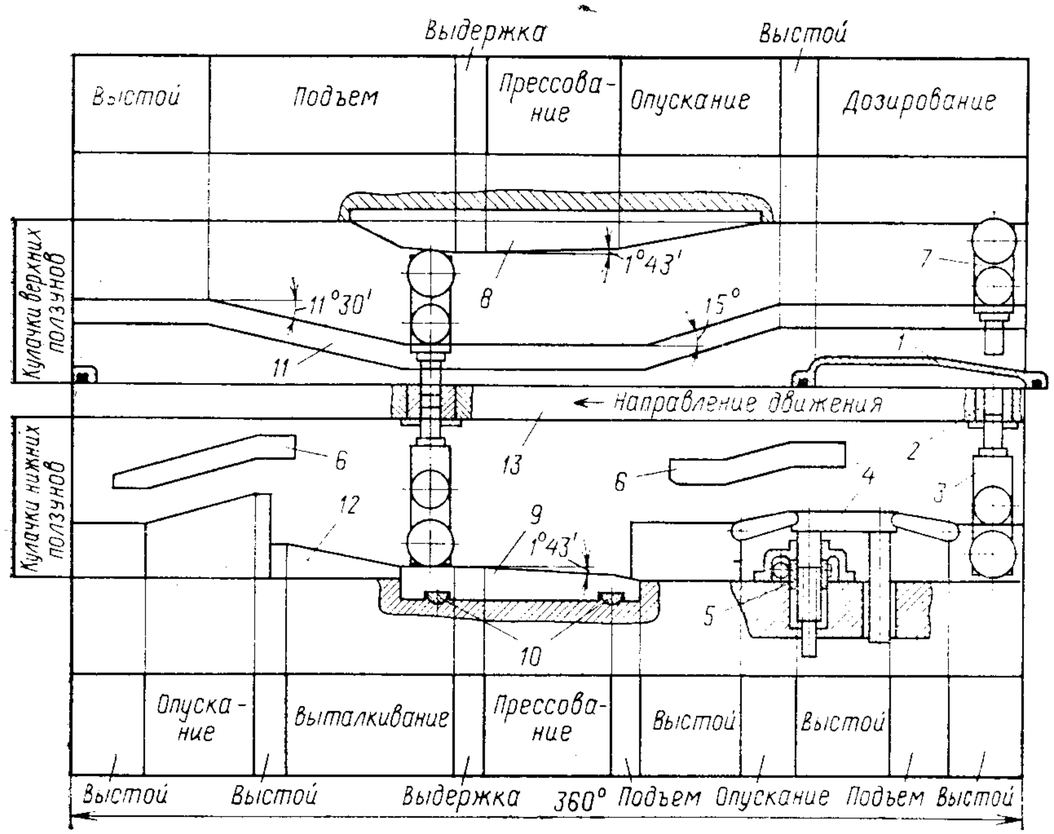


Рис. 2.8. Развернутая схема ротационной таблеточной машины МТ-3А и ее циклограмма:
1 — приемник; *2* — матрица; *3*, *7* — ползуны; *4* — дозирующий копир; *5* — регулятор дозирования; *6* — кулачок; *8*, *9*, *11*, *12* — копиры; *10* — клинья; *13* — ротор.

регулируют положение нижнего копира. Копир *11* служит для поднятия верхнего пуансона. При этом происходит выталкивание таблетки при набегании ролика ползуна нижнего пуансона на копир *12*.

Ротационные таблеточные машины являются полностью автоматизированными агрегатами. Они более сложны, чем другие виды таблеточных машин и требуют квалифицированного обслуживания.

Производительность ротационной таблеточной машины $Q_{тр}$ (шт./ч) может быть вычислена по формуле

$$Q_{тр} = 60 m_р N_р k_р i_р \qquad (2.18)$$

где $m_р$ — число рабочих позиций (комплектов пресс-инструмента); $N_р$ — частота вращения ротора, об/мин; $k_р$ — число гнезд пресс-инструмента; $i_р$ — кратность использования комплекта пресс-инструмента за один оборот.

Привод ротационных таблеточных машин осуществляется от асинхронного электродвигателя. Мощность электродвигателя рассчитывается при помощи диаграммы приведенных моментов сил сопротивления на валу ротора по формулам аналогичным (2.16) и (2.17). Кривая приведенных моментов ротационных машин имеет более плавный характер, чем аналогичная кривая для эксцентриковых машин (см. рис. 2.6), что является следствием наличия в конструкции машины массивных вращающихся элементов — ротора, зубчатых колес.

2.5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ТАБЛЕТОЧНЫЕ МАШИНЫ

Гидравлические таблеточные машины предназначены для получения крупных и массивных таблеток из пресс-порошков и волокнистых пресс-материалов. Большинство таблеточных машин этого типа представляет собой гидравлические прессы с горизонтальным расположением пресс-инструмента. В таких машинах применяется объемный способ дозирования таблетируемого материала, заключающийся в отсечении определенного объема порошка, поступающего из бункера, перемещающейся матрицей.

Гидравлические таблеточные машины отличаются простотой устройства, управления и обслуживания, стабильностью массы таблеток, низкими энергозатратами. При относительно небольших габаритах они развивают значительное усилие прессования, причем этот параметр может регулироваться в широком диапазоне. Конструкция горизонтальных таблеточных машин позволяет регулировать массу таблеток, время дозирования, скорость прессования, время таблетирования и скорость выталкивания. Привод рабочих органов осуществляется от гидроагрегата, состоящего из двух насосов. Один из них (высокопроизводительный насос низкого давления) служит для быстрого перемещения рабочих органов, второй (насос высокого давления и малой производительности) создает необходимое усилие прессования.

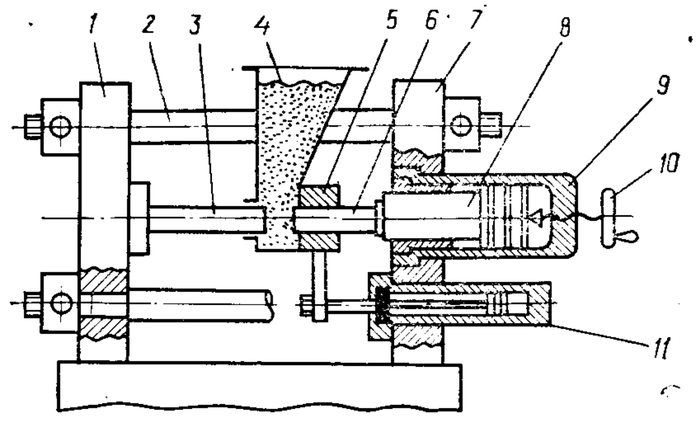


Рис. 2.9. Схема гидравлической таблеточной машины:
1, *7* — неподвижные плиты; *2* — колонна; *3*, *6* — прессующие пуансоны; *4* — бункер-питатель; *5* — подвижная матрица; *8* — плунжер; *9* — цилиндр; *10* — винтовой механизм; *11* — вспомогательный цилиндр.

На рис. 2.9 представлена схема гидравлической таблеточной машины с горизонтальным расположением рабочих органов. На станине укреплены две неподвижные плиты *1* и *7*, жестко связанные между собой колоннами *2*. К плите *7* прикреплен гидроцилиндр *9* с плунжером *8* и прессующим пуансоном *6*. Второй прессующий пуансон *3* закреплен на неподвижной плите *1*. Бункер-питатель *4* вместе с подвижной матрицей *5* перемещается по колоннам *2* с помощью двух вспомогательных цилиндров *11* (на схеме показан один цилиндр). Ход прессующего пуансона *6* регулируется винтовым механизмом *10*.

Таблеточная машина работает следующим образом. При перемещении бункера-питателя *4* с матрицей *5* влево относительно неподвижных пуансонов происходит отсекание сыпучего пресс-порошка, попавшего в пространство между торцами пуансонов (дозирование). Объем дозы определяется крайним правым положением плунжера *8*. Далее прессующий пуансон *6* перемещается влево при подаче рабочей жидкости в цилиндр *9*. Доза порошка сжимается и превращается в таблетку, после чего бункер-питатель отходит влево, выталкивая таблетку из матрицы, а рабочий прессующий пуансон перемещается вправо. Цикл работы машины заканчивается после возвращения бункера питателя с матрицей в крайнее правое положение.

Следует отметить, что при прессовании таблеток в машине данной конструкции осуществляется схема двухстороннего прессования с «плавающей» матрицей (см. рис. 2.2, *в*). Производительность гидравлической таблеточной машины $Q_{тг}$ (шт./ч) определяется по формуле

$$Q_{тг} = 60 m_г n_г \qquad (2.19)$$

где $m_г$ — число гнезд в пресс-инструменте; $n_г$ — число двойных ходов плунжера в минуту.

При известной массе одной таблетки $g_т$ (в граммах) может быть определена массовая производительность таблеточной машины $G_{тг}$ (кг/ч):

$$G_{тг} = 0{,}001 g m_г n_г \qquad (2.20)$$

Основной технической характеристикой гидравлической таблеточной машины является усилие прессования. В СССР выпускают эти машины с усилием прессования 320, 630, 1600 кН.

Таблетирование волокнистых материалов на рассмотренном выше оборудовании представляет значительные сложности ввиду трудности их объемного дозирования. Кроме того, таблетирование волокнитов требует значительной величины хода прессующего пуансона, поскольку объем волокнита при прессовании изменяется в несколько десятков раз. В связи с этим таблетирование волокнитов проводят на гидравлических прессах общего и специального назначения.

Характерной особенностью прессования волокнитов является двухстадийность (предварительное прессование дозы материала и окончательное таблетирование). Это делает возможным существенное сокращение времени технологического цикла и энергозатрат.

Усилие таблетирования волокнитов зависит от природы пресс-материала, его температуры, влажности. Так, для стекловолокнита АГ-4В усилие таблетирования составляет 15—20 МПа для влажного и 30—40 МПа для сухого материала.

Расчет на прочность элементов конструкции гидравлических таблеточных машин аналогичен приведенному в разд. 3.3 для гидравлических прессов.

2.6. УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА ТАБЛЕТОК ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Предварительный нагрев таблеток термореактивных материалов проводится с целью уменьшения продолжительности цикла прессования, снижения давления прессования. При подогреве снижается вязкость материала, что позволяет успешно изготавливать детали со сложной арматурой, с большими длинами затекания в полости пресс-инструмента. Кроме того, вследствие удаления влаги при подогреве улучшаются диэлектрические свойства и внешний вид изделий, снижается усадка. Таким образом, применение предварительного нагрева может существенно повысить производительность перерабатывающего оборудования и качество изделий.

Температурно-временное воздействие на материал при предварительном подогреве (до перенесения таблетки в пресс-форму для последующего прессования) должно быть ограничено достижением в связующем максимально допустимой степени протекания реакции отверждения c_x^* (см. разд. 1.3.4). Расчет времени t^*, соответствующего достижению c^* в расплаве термореактивного материала, проводится по уравнению (1.25) при $T_{пп} = T_р + (50 \div 60)$ К, где $T_{пп}$ — температура предварительного подогрева, а $T_р$ — температура размягчения.

Предварительный подогрев таблетированных реактопластов может проводиться различными методами. Наиболее распространен нагрев в генераторах токов высокой частоты (ТВЧ) и в контактных нагревателях. Методы нагрева таблеток острым паром, инфракрасными лучами, горячим воздухом в термошкафах не получили широкого распространения из-за их недостаточной эффективности.

2.6.1. Принцип работы генераторов ТВЧ, расчет времени и мощности нагрева

Принцип нагрева реактопластов-диэлектриков в электрическом поле заключается в поляризации электрических зарядов, содержащихся в их молекулах и атомах. Движение ионов и свободных электронов в диэлектриках приводит к макроструктурной поляризации, сопровождающейся выделением тепла. При помещении диэлектрика в поле ТВЧ количество выделившегося тепла пропорционально частоте электрического поля. Длительность диэлектрического нагрева материала зависит от его свойств (тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ и диэлектрической проницаемости ε). Произведение этих величин $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ называется коэффициентом потерь и характеризует скорость нагрева. Для термореактивных пресс-материалов коэффициент потерь равен 0,2—0,4.

Продолжительность нагрева материала в поле ТВЧ $t_н$ (с) может быть определена по формуле

$$t_н = \frac{c\rho_т (T_2 - T_1)}{k_н \eta_т \varepsilon \operatorname{tg}\delta f_к E^2} \qquad (2.21)$$

где c — теплоемкость, кДж/(кг·К); $\rho_т$ — плотность, кг/м^3; T_1, T_2 — начальная и конечная температуры таблетки, К; $k_н$ — коэффициент пропорциональности ($k_н = 0{,}55$ Гц$^{-1}$); $\eta_т$ — термический к. п. д., служащий для учета потерь тепла в окружающую среду, т. е. к. п. д. генератора ТВЧ; $f_к$ — частота колебаний, Гц; E — напряженность электрического поля, кВ/м.

Мощность электрического поля $W_н$ (кВт), потребляемая на нагрев порции материала массой G, определяется по соотношению

$$W_н = Gc (T_2 - T_1)/(t_н \eta_п) \qquad (2.22)$$

Формулы (2.21) и (2.22) показывают, что процесс теплообразования находится в зависимости от параметров электрического поля ТВЧ и диэлектрических свойств материала. Поскольку при этом тепло выделяется внутри материала, то нагрев осуществляется равномерно по всему объему таблетки.

2.6.2. Конструкции установок, правила безопасной работы на них.

В настоящее время для нагревания таблетированных реактопластов применяют главным образом генераторы ТВЧ с частотой колебаний 15—30 МГц и напряжением 3—8 кВ. Колеба-

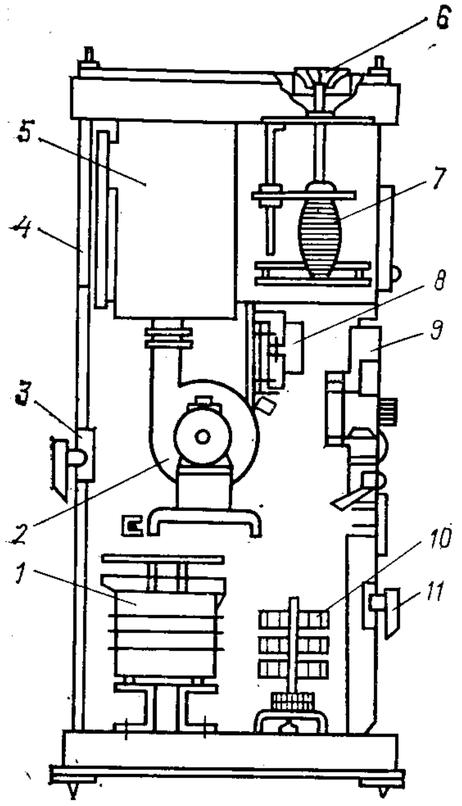


Рис. 2.10. Генератор ТВЧ типа ВЧД 2-1,6/40:
1 — анодный трансформатор; *2* — вентилятор; *3*, *11* — двери; *4* — металлический шкаф; *5* — генераторный блок с камерой рабочего конденсатора; *6* — рукоятка управления; *7* — рабочий конденсатор; *8* — аппаратура цепей питания и управления; *9* — лицевая панель; *10* — высоковольтный выпрямитель.

тельная мощность этих установок составляет 0,65—16 кВт. В этих генераторах можно проводить подогрев и нетаблетированного сырья в таре из фторопласта или в полиэтиленовых мешках.

Генератор ТВЧ (рис. 2.10) выполнен в виде металлического шкафа *4*, в котором размещены следующие элементы: генераторный блок *5* с камерой рабочего конденсатора, анодный трансформатор *1*, высоковольтный выпрямитель *10*, вентилятор *2* и аппаратура цепей питания и управления *8*. Приборы контроля и управления смонтированы на лицевой панели *9*. Доступ к оборудованию осуществляется через двери *3* и *11*, имеющие электромеханическую блокировку. Установка имеет механизм перемещения верхней пластины рабочего конденсатора *7* с выведенной наружу рукояткой управления *6*. Генератор снабжен системой экранирования излучения радиопомех.

Принцип работы установки заключается в преобразовании переменного напряжения промышленной частоты (50 Гц) в напряжение частотой 40,68 МГц. Таблетки устанавливают на поддоне или в специальных кассетах на нижний электрод, который одновременно служит заземленной пластиной конденсатора. Пластина верхнего электрода изготавливается сетчатой для лучшего пропускания паров влаги и летучих. После нагрева таблеток до заданной температуры электронное реле времени автоматически отключает генератор.

При обслуживании и ремонте установки необходимо строго соблюдать все правила техники безопасности, указанные в «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителем», относящиеся к высокочастотному оборудованию. Конструкция установки обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала при условии исправности электромеханических блокировок дверей установки и подноса и надежности заземления корпуса. К управлению процессом нагрева допускаются лица, проинструктированные по технике безопасности работы на высокочастотном оборудовании.

2.7. УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТАКТНОГО НАГРЕВА ТАБЛЕТОК

Контактный способ нагрева таблетированных реактопластов экономически целесообразен для небольшого числа таблеток диаметром до 70 мм. Способ заключается в подогреве таблеток между двумя плоскими металлическими плитами, обогреваемыми с помощью индукционных или омических нагревателей.

Расчет времени нагрева таблетки $t_н$ от температуры T_1 до T_2 при средней температуре плит T_w определяется на основании уравнения теплопроводности для нестационарного теплового потока по формуле

$$t_н = \mathrm{Fo}\, d^2/(4a) \qquad (2.23)$$

где $\mathrm{Fo}=at_н/d^2$ — критерий Фурье, значение которого находится по отношению разностей температур T_w—T_2 и T_w—T_1:

$\frac{T_w - T_2}{T_w - T_1}$	0,2	0,1	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
FO	0,38	0,5	0,55	0,595	0,605	0,62	0,7

d — характерный поперечный размер таблетки (диаметр или толщина), м; $a=\lambda/(c\rho)$ — коэффициент температуропроводности, м²/с; [λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); c — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³].

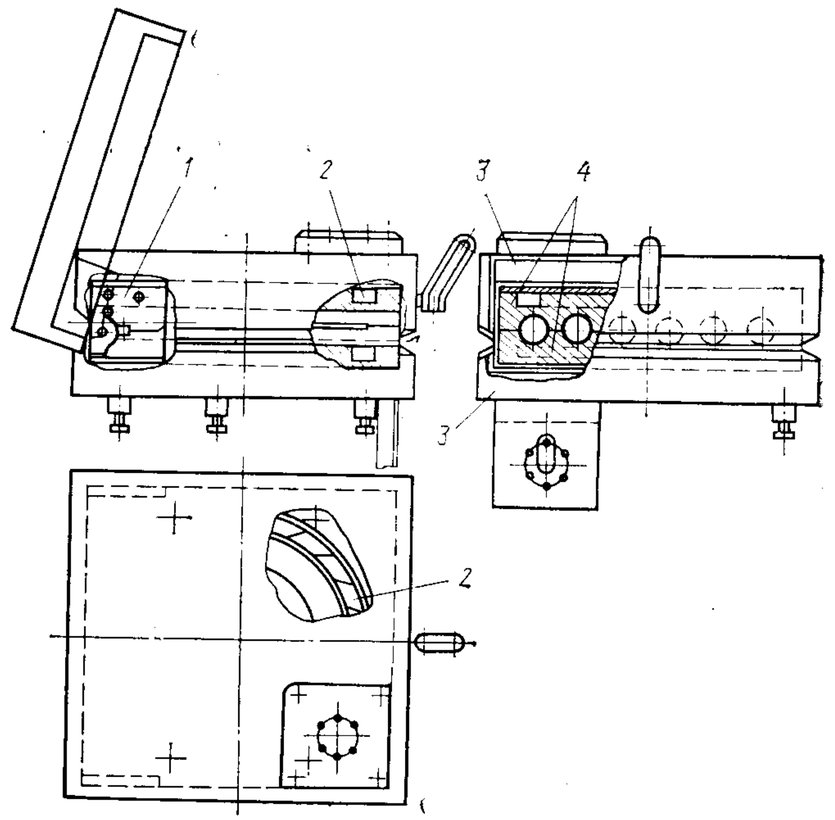


Рис. 2.11. Устройство для контактного нагрева таблеток:
1 — шарнир; *2* — индукторы; *3* — тепловая изоляция; *4* — плиты.

Устройство для контактного нагрева таблеток (рис. 2.11) состоит из двух нагревательных металлических плит *4*, соединенных с помощью шарнира *1*. С целью увеличения поверхности теплообмена в плитах делают проточки (пазы) для укладки в них таблеток на ребро. Обогрев плит осуществляется от индукторов *2*, состоящих из индукционных катушек, расположенных по периметру плит. Внешняя поверхность плит защищена тепловой изоляцией *3*. Размеры рабочих пазов выполняются такими, чтобы в них можно было вести одновременный нагрев четырех-шести порций таблеток.

Устройства для контактного нагрева просты в изготовлении и экономичны, их к. п. д. достигает 50—70%.

2.8. ЧЕРВЯЧНЫЕ ПЛАСТИКАТОРЫ

Проблемы механизации и автоматизации стадий таблетирования и предварительного подогрева термореактивных материалов с волокнистым наполнителем при прессовании могут быть успешно решены путем использования универсальных устройств — дозирующих червячных пластикаторов. Их применение существенно сокращает производственный цикл и повышает качество изделий, уменьшает потребность в обслуживающем персонале, способствует автоматизации процессов переработки.

Использование прессов, оснащенных червячными пластикаторами, имеет определенные преимущества по сравнению с использованием прессов, работающих с устройствами для предварительного таблетирования материала и подогрева таблеток в генераторах ТВЧ. Так, приведенные затраты при этом сокращаются на 25—35%, а часовая производительность возрастает на 50%.

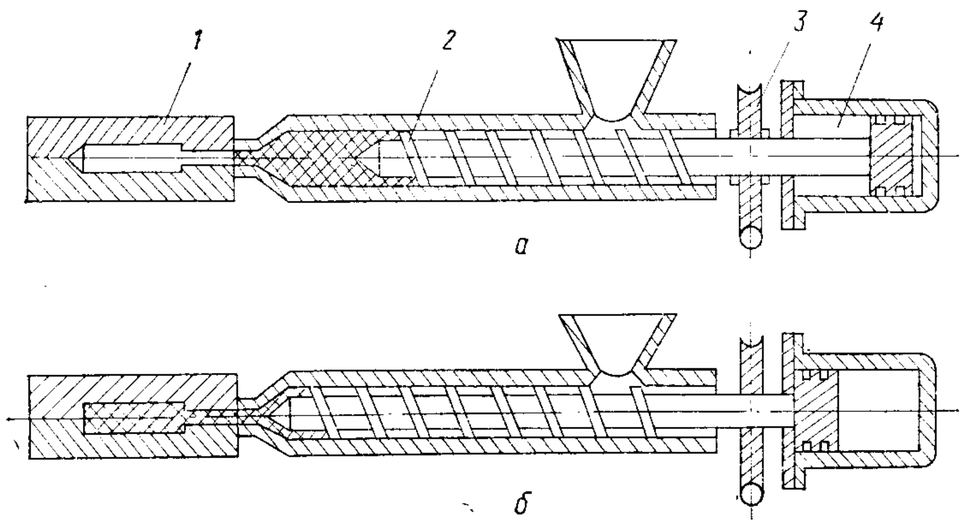


Рис. 2.12. Схема червячного пластикатора типа «червяк — поршень»:
а — пластикация; *б* — впрыск в пресс-форму;
1 — пресс-форма; *2* — пластикационный цилиндр с червяком; *3* — червячная передача привода вращения червяка; *4* — гидропривод осевого перемещения червяка.

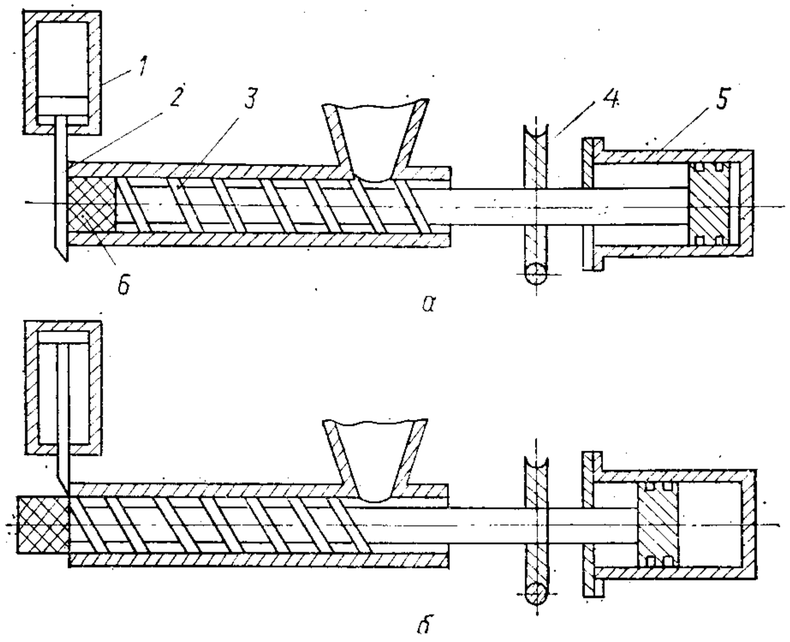


Рис. 2.13. Схема червячного пластикатора таблетирующего типа:
а — пластикация пресс-материала и его нагнетание в копильник; *б* — выдавливание из копильника и отрезание таблетки;
1 — гидропривод ножа; *2* — нож; *3* — пластикационный цилиндр с червяком; *4* — червячная передача привода вращения червяка; *5* — гидропривод осевого перемещения червяка; *6* — таблетка.

Червячные пластикаторы должны проектироваться и изготавливаться с универсальными загрузочными устройствами, которые позволяют проводить переработку различных типов сырьевых материалов — пресс-порошков, гранулята и волокнитов.

В настоящее время находят промышленное применение несколько типов червячных пластикаторов автоматического действия, из которых можно выделить следующие наиболее распространенные.

Пластикаторы типа «червяк — поршень» (инжекционного типа), изображенные на рис. 2.12. Последовательность операций технологического цикла пластикации (рис. 2.12, *а*) и впрыска (рис. 2.12, *б*) расплава в пластикаторах этого типа аналогична применяемым в схеме литья под давлением с предварительной пластикацией устройством «червяк — поршень» (см. гл. 5). Современные конструкции подобных пластикаторов способны подготавливать к впрыску в пресс-форму значительную по объему дозу расплава (до 2000 см³).

К недостаткам этого способа пластикации следует отнести значительные колебания дозы по массе и объему от цикла к циклу, неустойчивость работы при переработке быстроотверждающихся пресс-материалов, опасность преждевременного отверждения расплава в нагревательном цилиндре из-за интенсивных диссипативных тепловыделений при пластикации.

Червячные пластикаторы таблетирующего типа (рис. 2.13). Предназначены для изготовления стабиль-

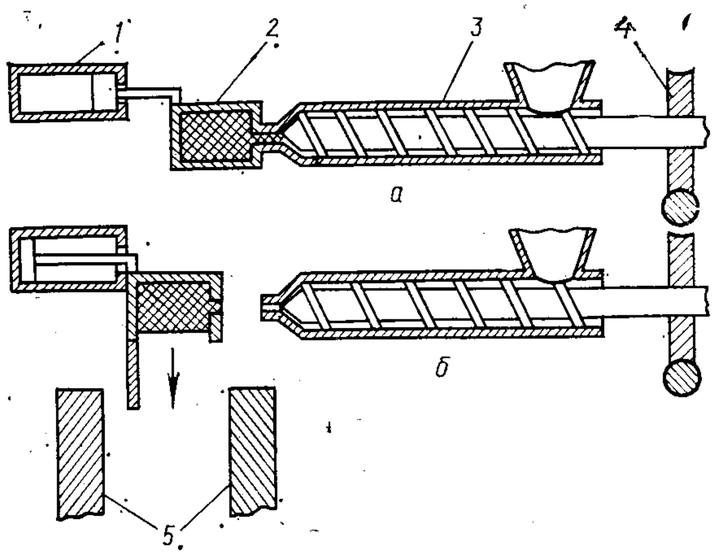


Рис. 2.14. Схема червячного пластикатора экструдирующего типа с копильником:

а — пластикация пресс-материала и его нагнетание в копильник; *б* — перемещение копильника и выгрузка расплава;
1 — гидропривод копильника; *2* — копильник; *3* — пластикационный цилиндр; *4* — червячная передача привода вращения червяка; *5* — пресс-форма.

ных по массе таблеток путем пластикации пресс-материала и его нагнетания в копильник, закрытый ножом-заслонкой (рис. 2.13, *а*). После окончания процесса пластикации нож-заслонка отодвигается, доза расплава выдавливается из копильника осевым перемещением червяка и отрезается ножом-заслонкой (2.13, *б*). Пластикаторы этого типа должны оснащаться специальными автоматическими устройствами для перемещения таблеток в матрицу пресса. Отечественной промышленностью серийно выпускаются червячные пластикаторы этого типа объемом впрыска 125, 250 и 500 см³/цикл.

Червячные пластикаторы экструдирующего типа (рис. 2.14) принципиально отличаются от описанных выше пластикаторов отсутствием осевого перемещения червяка и вынесением копильника за пределы пластикационного цилиндра. После завершения процесса пластикации и накопления дозы расплава (рис. 2.14, *а*) заполненный копильник-дозатор перемещается к пресс-форме *5*, после чего происходит выгрузка из него расплава композиции. Разновидностью данного типа пластикаторов является изображенный на рис. 2.15 червячный пластикатор с непрерывным выдавливанием расплава и отсеканием дозы ножевым устройством.

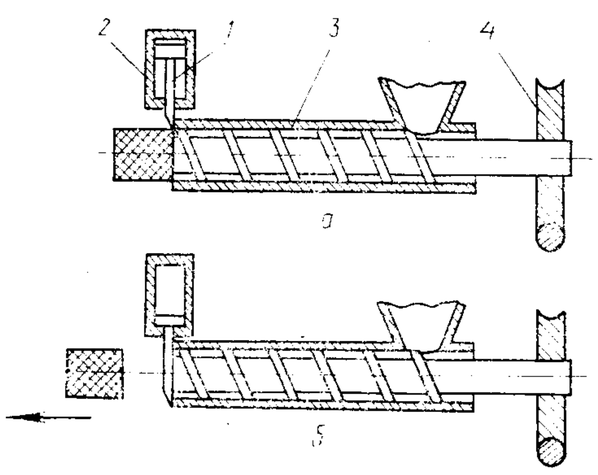
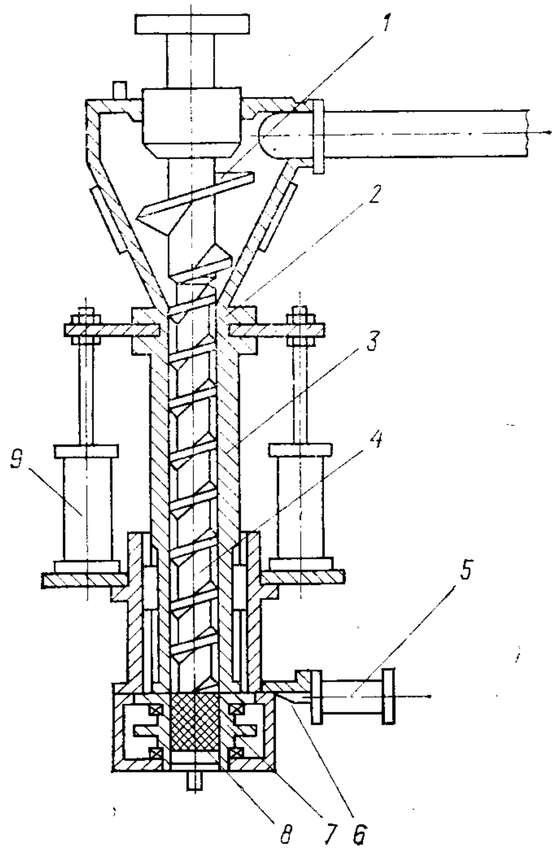


Рис. 2.15. Схема червячного пластикатора с непрерывным выдавливанием расплава:

а — выдавливание расплава; *б* — отсекание дозы ножевым устройством;
1 — гидропривод ножа; *2* — нож; *3* — пластикационный цилиндр с червяком; *4* — червячная передача привода вращения червяка.

Рис. 2.16. Червячный пластикатор вертикального типа:

1 — червяк-питатель; *2* — загрузочный бункер; *3* — материальный цилиндр; *4* — червяк-пластикатор; *5* — пневмоцилиндр; *6* — нож; *7* — дозирующая камера; *8* — доза расплава; *9* — гидроцилиндры.



Различные конструктивные типы пластицирующих устройств могут быть классифицированы по расположению оси червяка на *горизонтальные, вертикальные* и *наклонные.* Вертикальные пластикаторы наиболее предпочтительны в отношении удобства обслуживания, условий загрузки материала и экономии производственных площадей.

Червячный пластикатор вертикального типа, сконструированный в МИХМе (рис. 2.16), выгодно отличается простотой конструкции, малыми размерами и массой, высокой производительностью ввиду соосного расположения червяка и бункера. Пластикатор данной конструкции позволяет перерабатывать несыпучие волокнистые материалы.

Сырьевой материал поступает в загрузочный бункер *2*, в котором он захватывается коническим червяком-питателем *1*, уплотняется и перемещается в материальный цилиндр *3*. При движении по каналу нарезки червяка-пластикатора *4* материал пластицируется и скапливается в дозирующей камере *7*. Для предотвращения разрушения волокнистого наполнителя при выходе из канала вращающегося червяка *4* в неподвижную дозирующую камеру *7* последняя вращается от специального привода со скоростью, равной скорости вращения червяка. Два гидроцилиндра *9* служат для прижима камеры *7* к цилиндру *3* при наборе дозы *8* и перемещении ее вниз после окончания дозирования. Пневмоцилиндр *5* служит для приведения в действие ножа *6*, отсекающего набранную дозу расплава.

Червячный пластикатор этого типа может быть укреплен непосредственно на станине гидравлического пресса или авто-

номно, в непосредственной близости от пресса. Для обеспечения автоматического перемещения и загрузки дозированного материала в пресс-форму необходимо оснащение агрегата специальными автоматическими устройствами — манипуляторами.

Расчет времени цикла работы пластикатора, объемной производительности, потребляемой мощности при пластикации аналогичен представленному в разд. 5.4 для червячных пластикаторов литьевых машин. Расчеты на прочность элементов конструкции пластикатора могут быть выполнены по методике, изложенной в разд. 4.11.

ГЛАВА 3

ПРЕССЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РЕАКТОПЛАСТОВ И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

3.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА ПРЕССОВАНИЯ

Прессование — наиболее распространенный метод производства изделий из реактопластов и резиновых смесей, в ряде случаев он применяется и для получения изделий из термопластов. Метод основан на способности этих материалов переходить при нагревании в вязкотекучее состояние и заключается в формовании изделия из расплава в замкнутом объеме путем создания в материале необратимых деформаций.

Фиксация заданных размеров и конфигурации изделия происходит вследствие протекания в материале химической реакции отверждения (вулканизации) — в случае переработки реактопластов (резиновых смесей) или в результате охлаждения — в случае переработки термопластичного материала.

В промышленности нашли применение различные технологические схемы метода прессования, которые отличаются друг от друга способами нагрева материала, его ввода в форму и последующего формования: прямое (компрессионное), литьевое (трансферное) и непрерывное профильное (штранг-прессование). Однако все технологические схемы прессования, приведенные на рис. 3.1, включают в себя следующие операции: перевод материала в вязкотекучее состояние путем нагрева, деформирование материала с целью придания ему требуемой конфигурации и выдержка отформованного изделия для фиксации его формы. Схемы прямого и литьевого прессования приведены на рис. 3.2.

Прямое (компрессионное) прессование (рис. 3.2, *а*) протекает по одной из схем *I—IV* (см. рис. 3.1). Подготовленный к прессованию материал *1* (пресс-порошок, резиновая смесь) до-

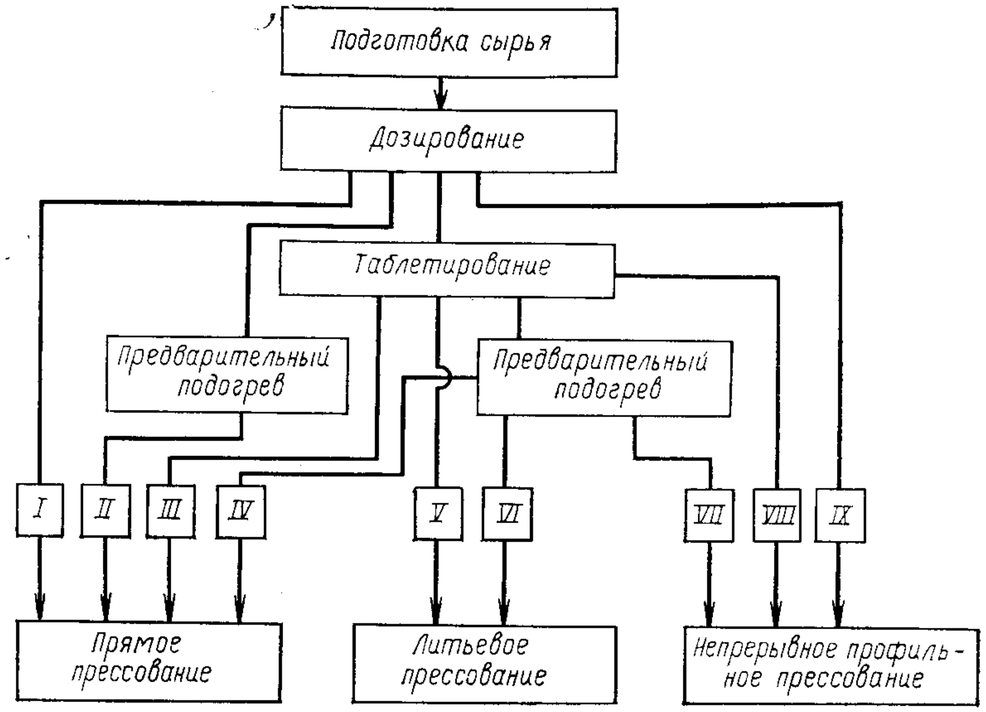


Рис. 3.1. Технологические схемы проведения процесса прессования.

зируется и поступает в загрузочную камеру матрицы *2*. При осуществлении технологического процесса по схеме *II* материал предварительно подогревается, при реализации схемы *III* — таблетируется. Для схемы *IV* характерно последовательное протекание стадий таблетирования и предварительного подогрева.

При смыкании формы, сопровождающемся нагревом материала, происходит прессование изделия при передаче давления через прессующий пуансон *3* (*3′*) на пресс-материал *1*. Придание изделию формоустойчивости в результате протекания в материале реакции отверждения (вулканизации) делает возможным последующее извлечение изделия *4* из нагретой пресс-формы без охлаждения. В случае прессования термопластичного материала затвердевание материала может происходить только при охлаждении пресс-формы, что значительно удлиняет производственный цикл и делает изготовление деталей из термопластов методом прессования экономически нецелесообразным.

Прямым (компрессионным) прессованием изготавливаются простые по форме изделия из всех видов пресс-материалов, включая волокниты. Применение предварительного подогрева таблетированного сырья, предварительной подготовки материала в червячных пластикаторах значительно увеличивают производительность метода и *прессосъем* — количество материала, перерабатываемого на прессе в течение года, отнесенное к 10 кН (1 тс) эффективного усилия пресса. С методом прямого

прессования во многом схоже прессование слоистых пластиков из листовых наполнителей, пропитанных термореактивным связующим. При этом роль пуансона и матрицы пресс-формы выполняют стальные полированные листы, между которыми укладывается наполнитель, заранее пропитанный связующим. Оформление изделия происходит при сжатии стальных листов плитами пресса при одновременном нагреве плит паром или электрическими обогревателями.

Литьевое (трансферное) прессование (рис. 3.2, *б*), осуществляемое по технологическим схемам V и VI (см. рис. 3.1), отличается от прямого прессования тем, что пресс-материал поступает не непосредственно в матрицу формы, а в загрузочную камеру, соединенную с оформляющей полостью пресс-формы литниковым каналом. Расплавленный в загрузочной камере *4* пресс-материал под действием давления, передаваемого плунжером *2*, через литниковые каналы *5* поступает в предварительно сомкнутую пресс-форму *1*. При движении по литниковым каналам материал дополнительно прогревается, что способствует более полному последующему отверждению массы материала в изделии *3*.

К существенным преимуществам литьевого (трансферного) прессования перед прямым прессованием следует отнести возможность изготовления сложных по конфигурации изделий с разной толщиной стенок, с отверстиями и арматурой. Изделия, полученные этим методом, отличаются высокой точностью размеров, отсутствием облоя. Литьевое прессование позволяет более полно автоматизировать производственный процесс, сни-

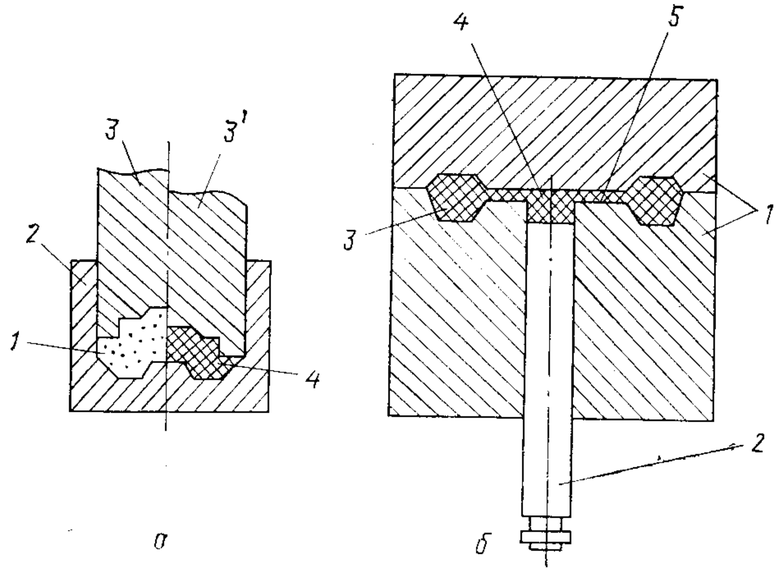


Рис. 3.2. Схемы процессов прямого (*а*) и литьевого (*б*) прессования:
а: *1* — пресс-материал; *2* — матрица; *3* — пуансон до смыкания пресс-формы; *3'* — пуансон после смыкания пресс-формы; *4* — изделие;
б: *1* — пресс-форма; *2* — плунжер; *3* — изделие; *4* — загрузочная камера; *5* — литниковые каналы.

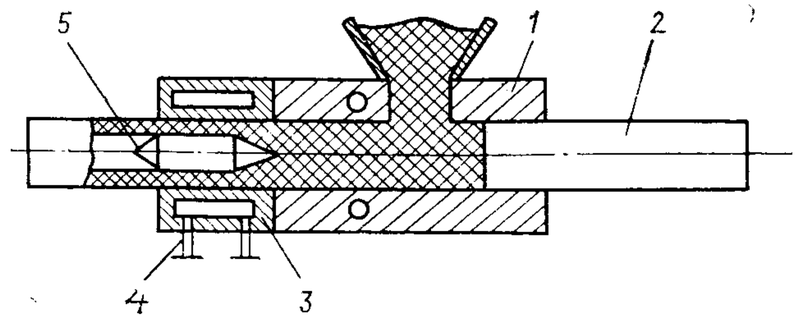


Рис. 3.3. Схема процесса непрерывного профильного прессования:
1 — инжекционный цилиндр; *2* — плунжер; *3* — мундштук; *4* — система обогрева; *5* — торпеда.

зить отходы сырья, устранить необходимость последующей механической обработки изделий.

Непрерывное профильное прессование, или штранг-прессование (рис. 3.3), применяется для получения профильных погонажных изделий постоянного сечения выдавливанием расплава пресс-материала через специальный мундштук. Технологические схемы *VII, VIII* и *IX* (см. рис. 3.1) отличаются лишь стадиями предварительной подготовки материала к профильному прессованию. Расплав пресс-материала непрерывно выдавливается из инжекционного цилиндра *1* под воздействием плунжера *2* через мундштук *3*. Привод плунжера *2* обеспечивает его возвратно-поступательное движение. При холостом ходе пресса в инжекционный цилиндр загружается материал (порошок, таблетка, резиновая смесь), при рабочем ходе происходит прогрев материала при помощи системы обогрева *4* и его выдавливание через мундштук, оснащенный торпедой *5*. При этом с каждым рабочим ходом плунжера приращиваются новые порции материала к ранее отпрессованным участкам выдавливаемого изделия.

Длина мундштука выбирается с таким расчетом, чтобы за время прохождения через него расплав термореактивного материала (резиновой смеси) успел затвердеть в результате интенсивного протекания реакции отверждения (вулканизации), а расплав термопласта охладиться для придания формоустойчивости изделию. В настоящее время этот способ прессования вытесняется способом экструзии на червячных машинах.

3.1.1. Процессы, протекающие в пресс-форме

Формование изделий методом прессования происходит при определенных значениях давления и температуры материала, а также времени прессования. Эти технологические характеристики определяют протекание различных стадий цикла прессования, а также качественные показатели готовых изделий.

Начало процесса прессования по любой из девяти рассмотренных выше схем характеризуется деформированием распла-

ва материала под воздействием непрерывно возрастающего давления прессования $p_п$. Конечное значение $p_п$, определяемое отношением эффективного усилия пресса (см. разд. 3.2.1) к площади проекции изделия на плоскость, перпендикулярную направлению действия этого усилия (при прямом прессовании), или к площади поперечного сечения плунжера (при литьевом прессовании и непрерывном выдавливании), зависит от таких факторов, как вязкость материала, размер и конфигурация изделия, размер и форма литниковых каналов.

Давление $p_п$, передаваемое на материал, расходуется на раздавливание нагретой таблетки, преодоление сопротивления течению расплава по оформляющей полости формы, в загрузочной камере, в литниковой системе, а в случае непрерывного выдавливания — в инжекционном цилиндре и мундштуке. Процесс заполнения пресс-формы завершается при проникновении расплава в наиболее удаленные участки матрицы. Эта стадия необходима для обеспечения уплотнения материала, оформления изделия и удаления газообразных летучих и паров влаги из формы. После этого следует стадия выдержки на отверждение. Величина $p_п$ на этой стадии достигает максимального значения. Для разных материалов и схем проведения процесса прессования максимальное значение $p_п$ различно. Оно зависит от вида пресс-материала, его свойств, температуры. При прямом прессовании пресс-порошков оно достигает 40—50 МПа, волокнитов — 70 МПа. В загрузочной камере при литьевом прессовании и в инжекционном цилиндре при непрерывном выдавливании значение $p_п$ гораздо выше и достигает 150—200 МПа.

Температура расплава прессуемого материала определяет интенсивность протекания в нем реакции отверждения (вулканизации) и в конечном счете — производительность прессового оборудования и комплекс физико-механических свойств изделий. Для достижения в готовом изделии максимально однородной по массе степени отверждения (вулканизации) необходимо быстрое достижение и эффективное поддержание заданной температуры материала во всем объеме изделия на стадиях заполнения формы и выдержки на отверждение. При выполнении этого условия в готовом изделии не образуются термические напряжения, способные вызвать его разрушение после окончания цикла прессования.

Температура расплава $T_м$ связана с продолжительностью цикла прессования $t_ц$. Увеличивая $T_м$, можно достичь сокращения $t_ц$ за счет роста скорости заполнения формы при снижении вязкости расплава и уменьшения продолжительности выдержки при прессовании и отверждении вследствие роста скорости отверждения. Сокращение времени $t_ц$ может быть достигнуто при использовании предварительного подогрева материала вне формы и высокотемпературных технологических режимов. Повышению качества изделия способствуют специальные технологические приемы, например подпрессовки при прямом прессовании, т. е. повторяемое несколько раз кратковременное размыкание пресс-формы на стадии формования и отверждения. Это способствует более полному выходу летучих веществ и более глубокому прогреву материала.

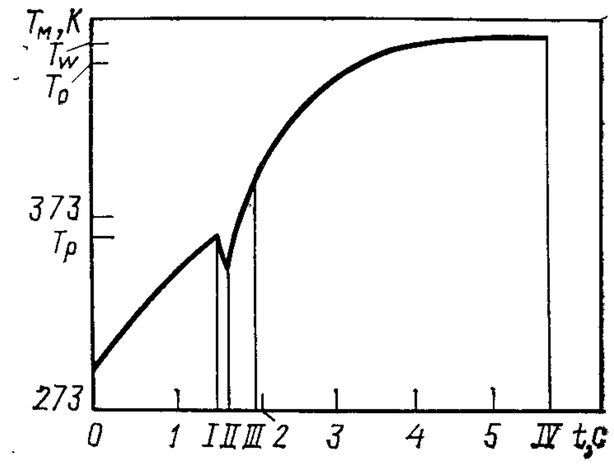


Рис. 3.4. Изменение температуры материала $T_м$ во времени в процессе прессования.
Пояснение в тексте.

Изменение температуры $T_м$ во времени при прессовании показано на рис. 3.4. На оси ординат помечены температура стенки формы T_w, температура перехода пресс-материала в вязкотекучее состояние (температура размягчения) $T_р$ и температура интенсивного протекания реакции отверждения (вулканизации) $T_о$. Отрезки на оси абсцисс этой диаграммы соответствуют отдельным стадиям цикла формования изделий при прессовании: отрезок *0—I* — время предварительного подогрева материала $t_{пп}$ непосредственно в матрице или в устройстве для предварительного подогрева; отрезок *I—II* — время загрузки (транспортирования) материала в пресс-форму $t_{т1}$; отрезок *II—III* — время заполнения $t_з$ расплавом оформляющей полости формы под воздействием давления $p_п$, сопровождающегося интенсивным разогревом материала за счет диссипативных тепловыделений и теплопередачи от стенок формы; отрезок *III—IV* — время выдержки под давлением $t_в$, в течение которого расплав продолжает нагреваться от стенок пресс-формы до температуры интенсивного протекания реакции отверждения.

Время цикла изготовления изделий методом прямого прессования может быть определено по формуле

$$t_ц = t_{пп} + t_{т1} + t_з + t_в + t_{т2} \qquad (3.1)$$

где $t_{т2}$ — время выгрузки готового изделия.

Сумма продолжительности отдельных операций цикла формования $t_{пп}$, $t_{т1}$, $t_з$ должна быть меньше времени плато вязкости t^* материала. Если время t^* оказывается исчерпанным, то рост вязкости приводит к тому, что изделие оказывается неотформованным. Таким образом

$$t_{пп} + t_{т1} + t_з < t^* \qquad (3.2)$$

Диаграмма $T_м = f(t)$, представленная на рис. 3.4, может служить для определения t^* материала в данных температурно-временных условиях по методике, изложенной в разд. 1.3.4.

Расчет составляющих цикла прямого прес-

сования изделий необходимо начинать с определения или выбора следующих исходных данных:

1) характеристики перерабатываемого материала ($T_р$, $T_о$, c, λ, ρ);

2) конфигурация и толщина изделия;

3) параметры $T_м$ и T_w.

Расчет времени нагрева $t_{пп}$ от начальной температуры $T_н$ до температуры, близкой к $T_р$, проводится по формуле (2.21) для нагрева в генераторе ТВЧ или по формуле (2.23) для контактного нагрева таблеток в матрице. Время $t_{т1}$ связано с перенесением таблетки из устройства для предварительного подогрева в пресс-форму и зависит от быстроты проведения этой операции вручную или с помощью механических загрузчиков. Продолжительность этой операции 1—5 с; время $t_{т2}=t_{т1}$.

Ввиду разнообразия конструкции и конфигурации изделий промышленного ассортимента аналитический расчет времени заполнения пресс-формы с учетом технологических параметров, свойств материала и геометрии изделий представляет значительные трудности. Для каждого типа пресса, выбранного технологического режима и вида пресс-материала могут быть рекомендованы значения скорости и времени заполнения с привлечением для этой оценки экспериментальных данных. В большинстве случаев время $t_з$ не превышает 3—4 с, а прирост температуры материала при этом составляет не более 30 К.

Продолжительность временно́го отрезка $t_в$ может быть представлена как сумма составляющих $t_н$ (время нагрева от температуры, близкой к $T_р$, до температуры интенсивного протекания реакции отверждения $T_о$) и $t_о$ (время отверждения, соответствующее достижению в изделии формоустойчивости и заданных физико-механических характеристик). Время $t_н$ может быть определено по формуле (2.23), а время $t_о$ оценено по методике, изложенной в разд. 1.3.4, при степени отверждения $c_x^*=0{,}9\div0{,}95$.

Для упрощенной оценки $t_в$ можно воспользоваться и следующей формулой, полученной на основе экспериментальных данных:

$$t_в = t_{уд1}h \qquad (3.3)$$

где $t_{уд\,1}$ — время отверждения 1 мм толщины изделия (для реактопластов $t_{уд\,1}=0{,}8\div2$ мин/мм); h — толщина изделия.

Определение $t_ц$ для литьевого (трансферного) прессования аналогично описанному выше для прямого прессования. При этом составляющая $t_з$ при литьевом прессовании может быть определена по методике, предложенной в разд. 5.4.2. для литья под давлением.

Следует иметь в виду, что вклад составляющей $t_{пп}$ в $t_ц$ может быть сокращен путем использования предварительного подогрева материала вне полости формы.

Важной характеристикой технологического процесса прессования является циклограмма пресса. Это построенная расчетным путем кривая изменения усилия прессования за время одного цикла. В ней находят отражение устанавливаемые при выборе технологического режима скорость смыкания пресс-формы, продолжительность прессования, число подпрессовок, значение усилия прессования на отдельных стадиях цикла прессования и т. д.

3.1.2. Общее устройство и работа пресса

Прессы — машины статического действия — предназначены для формования изделий из пресс-материалов путем приложения давления. Разнообразные современные конструкции прессового оборудования могут быть классифицированы по ряду признаков. Наиболее важной представляется классификация по виду привода, подразделяющая все прессы на три категории: *с механическим, с гидромеханическим* и *с гидравлическим приводом.*

Прессы с механическим приводом распространены сравнительно мало. Они используются при автоматическом производстве изделий с малыми габаритами и массой, для изготовления которых не требуются большие значения параметров $p_п$ и $t_ц$, а также при таблетировании. Конструкции прессов с механическим приводом разнообразны: винтовые, кривошипные, рычажные, ротационные и др.

Прессы с гидромеханическим приводом с успехом применяют для изготовления изделий с малым циклом прессования. Совмещение в конструкции пресса механической системы (например, рычажной) с гидравлическим цилиндром позволяет развивать значительные скорости предварительного смыкания пресс-инструмента, а при осуществлении собственно прессования создавать высокое давление в полости формы. Из-за больших габаритов, сложности конструкции и высокой стоимости эти прессы так же не нашли широкого распространения в промышленности.

Прессы с гидравлическим приводом обладают значительными преимуществами перед другими прессами. Они просты в управлении, экономичны, бесшумны, имеют сравнительно небольшие габариты при значительной развиваемой мощности. Эти прессы являются наиболее распространенным прессовым оборудованием. Принцип действия этого вида прессов может быть объяснен на примере изображенного на рис. 3.5. гидравлического пресса с верхним расположением рабочего цилиндра. Рабочая жидкость (эмульсия или масло) поступает под давлением $p_г$ в рабочий гидроцилиндр *1* в пространство над плунжером *2*. В результате этого плунжер *2* перемещается вниз вместе

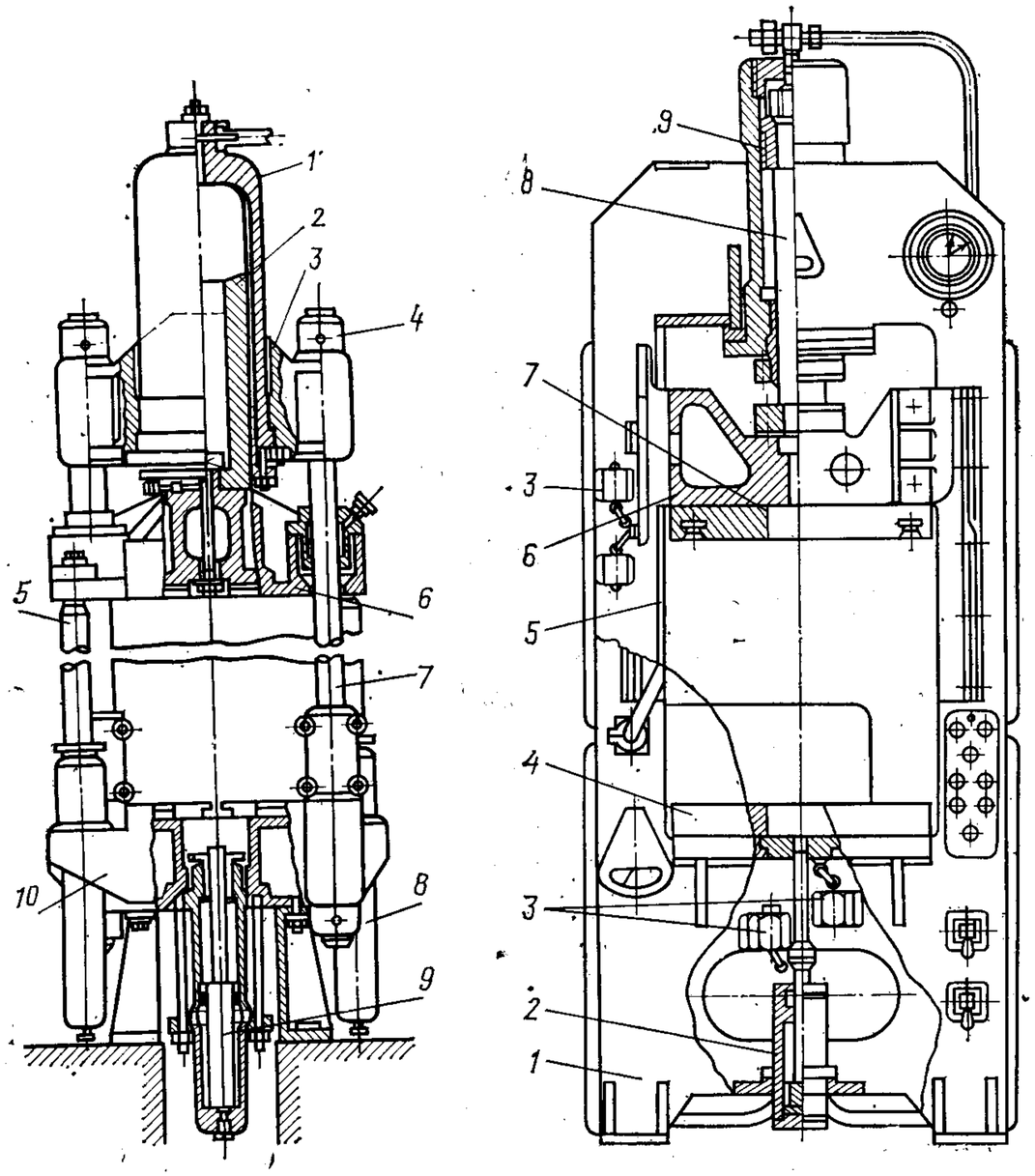


Рис. 3.5. Гидравлический колонный пресс с верхним расположением рабочего цилиндра:

1 — рабочий гидроцилиндр; *2* — плунжер; *3* — верхняя неподвижная поперечина (архитрав); *4* — гайка; *5* — шток возвратного цилиндра; *6* — подвижная поперечина; *7* — колонна; *8* — возвратный цилиндр; *9* — гидроцилиндр выталкивателя; *10* — нижняя неподвижная поперечина (стол).

Рис. 3.6. Гидравлический пресс рамной конструкции с верхним расположением рабочего цилиндра:

1 — рама; *2* — выталкиватель; *3* — конечные выключатели; *4* — стол; *5* — направляющие; *6* — ползун; *7* — плита; *8* — плунжер рабочего гидроцилиндра; *9* — рабочий гидроцилиндр.

с соединенной с ним подвижной плитой *6* под действием усилия $P_н$, равного

$$P_н = (\pi D_1^2/4)\, p_г \qquad (3.4)$$

где D_1 — диаметр плунжера.

Усилие $P_н$ называется *номинальным усилием прессования.* Это один из основных параметров технической характеристики пресса.

Конструкция гидравлического пресса, как правило, включает в себя следующие основные механизмы и детали: станина, цилиндры (рабочий, возвратный, выталкивающий) с плунжерами или с поршнями; подвижные и неподвижные поперечины; гидроагрегат, состоящий из насосов, трубопроводов и распределителей потока жидкости.

По направлению действующего усилия гидравлические прессы подразделяются на *вертикальные, горизонтальные* и *угловые.* Наиболее распространены прессы вертикальной конструкции, которые в свою очередь подразделяются по расположению рабочего цилиндра на прессы *с верхним* и *нижним рабочими цилиндрами.* В зависимости от конструкции станины прессы бывают *колонные, рамные* и *челюстные.*

Для наименования основных подвижных рабочих органов пресса, представляющих собой плиту той или иной формы, используются следующие термины: *ползун* — для прессов рамного типа; *поперечина подвижная* — для прессов колонного типа.

В показанном на рис. 3.5 колонном прессе с верхним расположением рабочего цилиндра верхняя неподвижная поперечина (архитрав) *3* и нижняя неподвижная поперечина (стол) *10* соединены гайками *4* с четырьмя колоннами *7,* которые являются направляющими для подвижной поперечины *6.* На верхней поперечине смонтирован рабочий цилиндр *1,* а возвратные цилиндры *8* укреплены в боковых приливах поперечины *10.* Штоки возвратных цилиндров *5* также соединены с подвижной поперечиной *6.* Такой конструкцией обеспечивается силовой рабочий ход и возвратный холостой ход подвижной поперечины при попеременной подаче жидкости в рабочий и возвратный гидроцилиндры. Выталкивание изделия из пресс-формы осуществляется гидроцилиндром выталкивателя *9.* Колонные прессы обеспечивают доступ к пресс-форме, однако имеют значительные габариты и металлоемкость, а также малую жесткость.

Эти недостатки устраняются в прессах рамной конструкции (рис. 3.6), имеющих сварную раму *1.* В верхней части рамы жестко закреплен рабочий гидроцилиндр *9* с дифференциальным поршнем *8* двойного действия, т. е. рабочий и обратный ходы поршня осуществляются при условии подачи рабочей жидкости в верхнюю или нижнюю возвратную полости рабочего цилиндра. Ползун *7* движется по направляющим *5* под действием соединенного с ним поршня *8.* В нижней части рамы расположен стол *4* и выталкиватель *2.* Для ограничения хода плиты *6* и штока выталкивателя *2* служат выключатели *3.*

Челюстные прессы находят применение в том случае, если для обеспечения работы пресс-инструмента необходим свободный доступ к нему с трех сторон.

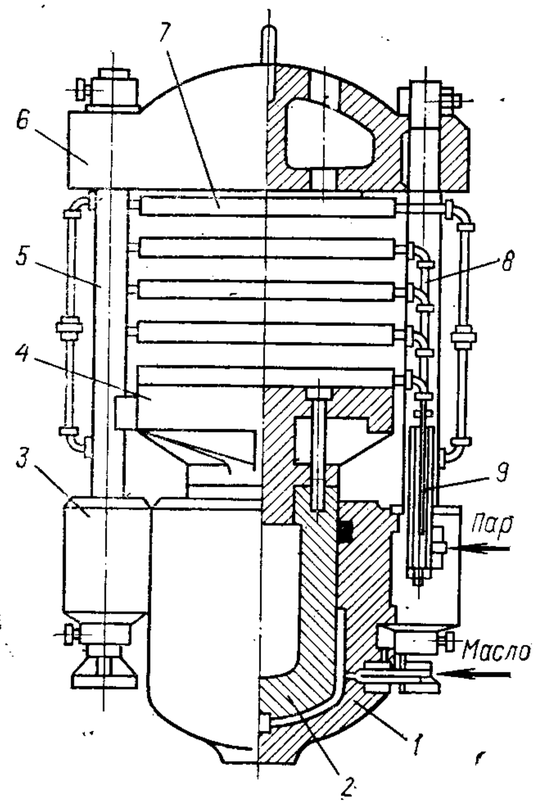


Рис. 3.7. Схема колонного четырехэтажного пресса с нижним расположением рабочего цилиндра:

1 — рабочий цилиндр; *2* — плунжер; *3* — станина; *4* — подвижный стол; *5* — колонна; *6* — архитрав; *7* — обогревающие плиты; *8* — узел обогрева; *9* — распределитель пара.

Достоинством прессов с нижним расположением рабочего цилиндра (рис. 3.7) является устойчивость (так как центр тяжести у них расположен достаточно низко), небольшие габариты фундаментов, простота конструкции и управления. Эти прессы используют в том случае, если применяются простые съемные формы и необходимы большие усилия прессования. Возврат в рабочее положение нижнего ползуна после прессования часто происходит под действием собственного веса.

Для прессования изделий из термореактивных пресс-материалов используются чаще всего прессы колонной и рамной конструкции с верхним расположением рабочего цилиндра. Прессование слоистых пластиков проводят на этажных прессах (см. ниже) колонной конструкции с нижним расположением рабочего цилиндра. Для формования и вулканизации резиновых изделий чаще всего используют прессы с верхним и нижним рабочими цилиндрами со станиной рамной или челюстной конструкции.

Гидравлические прессы могут быть также классифицированы: по способу управления *(с ручным, полуавтоматическим* и *автоматическим управлением);* по способу обогрева пресс-форм *(с электрическим, паровым* и *индукционным обогревом);* по специфике конструкции *(этажные, карусельные, ротационные* и т. д.).

3.2. ПАРАМЕТРЫ ПРЕССА

Конструкция пресса может быть охарактеризована с помощью комплекса параметров, определяющих его конструктивные размеры, скорость перемещения рабочих органов и величину реализуемого силового воздействия на перерабатываемый материал. Эти параметры образуют техническую характеристику пресса, а выбор их при конструировании прессового оборудования

в каждом конкретном случае может быть проведен на основе изучения технологических параметров процесса прессования, определяющих формование качественного изделия.

3.2.1. Усилие и скорость прессования

Эффективное усилие прессования $P_э$, развиваемое подвижной поперечиной (ползуном) пресса (рис. 3.8) и обеспечивающее создание в полости формы давления $p_п$, определяется по формуле

$$P_э = k_1 p_п S_1 \qquad (3.5)$$

где k_1 — число гнезд в пресс-форме; S_1 — площадь проекции изделия на плоскость смыкания формы (см. рис. 3.8).

Давление $p_п$ является технологическим параметром, выбираемым на основе экспериментальных данных (см. разд. 3.1.1).

Величина $P_э$ связана с номинальным усилием прессования $P_н$ следующими соотношениями:

для прессов с верхним рабочим цилиндром

$$P_н = P_э + T_у + G_п \qquad (3.6)$$

для прессов с нижним рабочим цилиндром

$$P_н = P_э + T_у - G_п \qquad (3.6а)$$

где $T_у$ — потери на трение в уплотнениях; $G_п$ — вес подвижных деталей пресса [главного плунжера, подвижной плиты (поперечины), верхней полуформы].

Потери на трение $T_у$ в манжетных уплотнениях (см. разд. 3.3.4) могут быть оценены следующим образом:

$$T_у = \pi D_п h_c p_г f \qquad (3.7)$$

где $D_п$ — диаметр плунжера; h_c — высота соприкосновения манжет с плун-

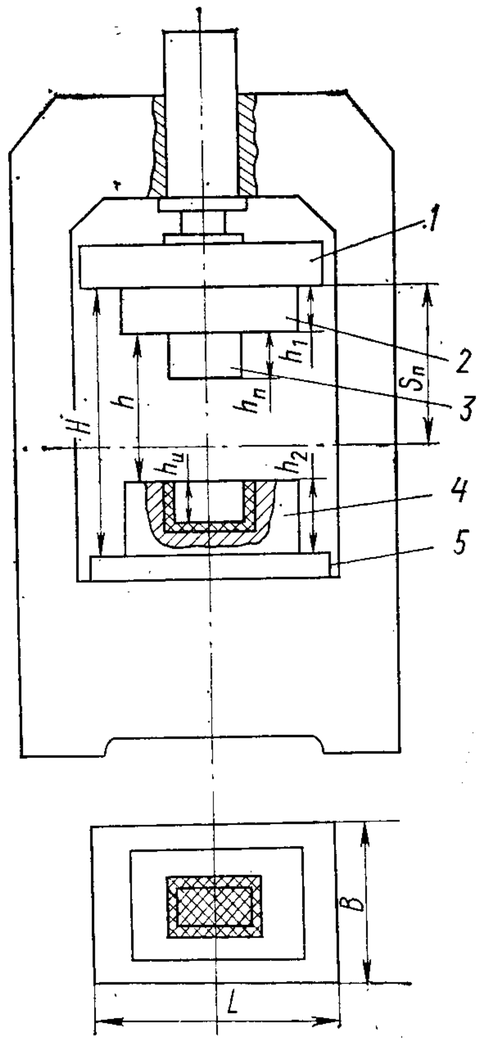


Рис. 3.8. К расчету параметров технической характеристики пресса (внизу показан стол пресса; заштрихованная область — площадь проекции изделия на плоскость смыкания полуформ пресс-формы S_1):

1 — ползун; *2* — верхняя плита пресс-формы; *3* — пуансон пресс-формы; *4* — нижняя плита пресс-формы с матрицей; *5* — стол пресса.

жером; $p_г$ — давление жидкости в гидроцилиндре; f — коэффициент трения манжет о плунжер (для кожи 0,06—0,08, для резины 0,01—0,02).

Для комплекта упругих уплотнительных поршневых колец формула (3.7) может быть видоизменена:

$$T_у = \pi b D_п f_1 (z p_к + p_г)$$

где b — ширина кольца; f_1 — коэффициент трения фрикционной пары чугун — сталь ($f_1 = 0{,}15 \div 0{,}25$); z — число колец; $p_к$ — давление от сил упругости кольца (для гидравлических устройств $p_к = 0{,}1 \div 0{,}2$ МПа); $p_г$ — давление в гидросистеме.

По аналогичной схеме может быть рассчитано номинальное усилие выталкивания изделия. Эффективное усилие выталкивания изделия $P_{вэ}$ может быть оценено как усилие, необходимое для преодоления сил адгезии материала к рабочим (боковым) поверхностям матрицы пресс-формы:

$$P_{вэ} = k_1 p_{ад} S_б \qquad (3.8)$$

где $p_{ад}$ — адгезионная прочность соединения реактопласта с металлической поверхностью после отверждения (для фенопластов $p_{ад} = 0{,}1 \div 0{,}4$ МПа); $S_б$ — боковая поверхность матрицы пресс-формы.

Скорость прессования, определяемая скоростью перемещения подвижной плиты (поперечины) в рабочем режиме, выбирается из условия обеспечения минимального времени заполнения формы $t_з$. В современных ускоренных режимах прессования скорость прессования может изменяться в пределах от 100 до 250 мм/с.

3.2.2. Параметры, определяемые конфигурацией формуемого изделия и размерами пресс-формы

Конфигурация и геометрические размеры изделия и пресс-формы влияют на выбор ряда параметров технической характеристики, таких как размеры рабочего стола, ход ползуна, наибольшее расстояние между столом и ползуном.

Размеры рабочего стола B и L (см. рис. 3.8) выбираются с таким расчетом, чтобы укрепляемая на нем нижняя полуформа не выходила за его габариты. Ход ползуна $S_п$ определяется следующим соотношением:

$$S_п \geqslant h \qquad (3.9)$$

где

$$h \geqslant h_п + h_и \quad \text{или} \quad h \geqslant h_п + h_т$$

здесь $h_п$ — высота пуансона; $h_и$ — высота изделия, равная глубине матрицы; $h_т$ — высота таблетки.

Условием (3.9) обеспечивается свободный съем изделия и беспрепятственная загрузка таблеток.

Наибольшее расстояние между столом и ползуном H определяется соотношением

$$H \geqslant h_1 + h + h_2 \qquad (3.10)$$

где h_1 и h_2 — высота верхней и нижней плит пресс-формы соответственно.

Следует отметить, что при выборе параметров B, L, $S_п$, H следует ориентироваться на весь возможный для данного пресса ассортимент изделий и многообразие конструкций пресс-форм для их изготовления.

3.2.3. Стандартизованные параметры

Основные параметры гидравлических прессов для пластмасс стандартизованы (ГОСТ 8200—80). Кроме параметров $P_н$, $S_п$, B, L, H регламентированы номинальное усилие и ход нижнего выталкивателя, скорость холостого хода ползуна, а также удельная материалоемкость (отношение массы пресса к произведению номинального усилия на ход ползуна и площадь стола) и удельная энергоемкость (отношение мощности привода пресса к произведению номинального усилия на ход ползуна и скорость ползуна при номинальном усилии). Значения стандартизованных параметров представлены в табл. 3.1.

3.3. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ПРЕССА

3.3.1. Станины и плиты

Станина служит для монтажа и фиксации в заданных положениях всех механизмов пресса и является замыкающим звеном, воспринимающим номинальное усилие, возникающее при его работе. Станина должна быть достаточно прочной и жесткой, чтобы обеспечить требуемую точность взаимного расположения механизмов пресса и относительного положения инструмента и обрабатываемого объекта при динамических нагрузках, сопровождающих работу пресса.

Из всего многообразия конструкций прессового оборудования наиболее употребительными являются два типа станин: колонный и рамный.

Станина колонного типа представляет собой две неподвижные поперечины (верхнюю и нижнюю) с соединяющими их колоннами. Колонн чаще всего бывает две или четыре. Колонны служат направляющими для подвижной поперечины.

Станина рамного типа отливается целиком или сваривается из листов, вырезанных в виде рамы. На стойках рамы помещаются регулируемые направляющие для ползуна. Плоскость направляющих перпендикулярна плоскости стола пресса. Число стоек пресса (одна, две или более) выбирается исходя из назначения пресса, конструкции пресс-формы, требуемых габаритов пресса. Технологически станины выполняются литыми (чугунными или стальными), сварными, сварно-литыми или сборными, состоящими из литых или сварных деталей. Применяемые материалы: чугунное литье СЧ 24—44; стальное литье 35Л, 45Л; листовой прокат (для сварных конструкций) из стали марки Ст. 3.

Таблица 3.1. Параметры прессов

Наименование основных параметров и размеров	Нормы															
Номинальное усилие $P_н$, кН	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300						
Ход ползуна, $S_п$, мм	320	320	450	450	450	560	630	710	800							
Наибольшее расстояние между столом и ползуном, H, мм	500	500	710	710	800	900	1000	1250	1400	1600						
Размеры стола, мм																
L	320	320	560	560	630	710	800	1120	1250	1400						
B	250	250	500	500	560	630	710	1000	1120	1250						
Номинальное усилие нижнего выталкивателя, кН, не менее	20	31,5	50	80	125	200	315	500	630	1000						
Ход нижнего выталкивателя, мм	100	100	160	160	160	200	250	360	360	450						
Скорость холостого хода ползуна, мм/с, не менее																
вниз	100	100	200	200	200	200	200	200	100	100						
вверх	100	100	70	70	70	70	70	60	50	40						
Скорость рабочего хода ползуна регулируемая, мм/с																
наибольшая	10	10	50	50	50	50	50	50	4	2,5						
наименьшая	2	2	1	1	1	1	1	1	—	—						
Скорость рабочего хода нижнего выталкивателя регулируемая, мм/с	—	—	100	100	100	100	100	100	100	15						
наибольшая	—	—	5	5	5	5	5	5	5	—						
наименьшая	800	500	100	63	36	20	11	6	3,6	4,2						
Удельная материалоемкость (без средств автоматизации), кг/(кН·м³), не более	0,12	0,09	0,09	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04						
Удельная энергоемкость, кВт/(кН·м²/мин), не более																

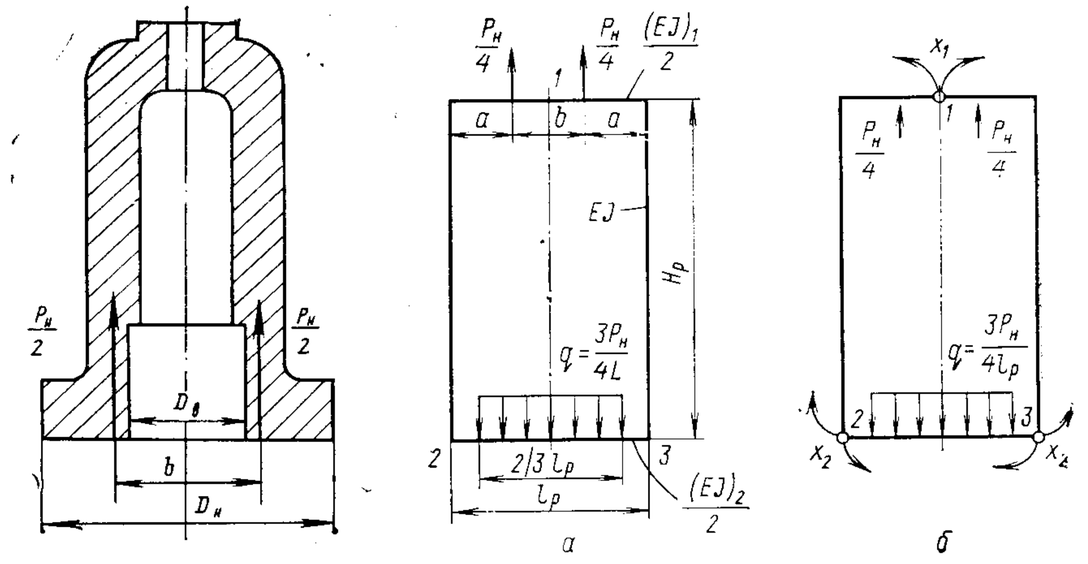


Рис. 3.9. К определению центра тяжести полуфланцев гидроцилиндра.

Рис. 3.10. К расчету на прочность станины пресса (*а* — схема нагружения, *б* — схема врезки шарниров). Пояснения в тексте.

Расчет на прочность станины одноцилиндрового пресса проводится при следующих допущениях.

1. Станина представляет собой замкнутую статически неопределимую плоскую раму, нагруженную приложенными силами и моментами.

2. Колонны имеют жесткое крепление в верхней и нижней поперечинах.

3. Номинальное усилие прессования $P_н$ от цилиндра, имеющего фланцевое крепление к верхней поперечине, передается в виде пары сил, приложенных в центрах тяжести каждого из полуфланцев (рис. 3.9). Расстояние b между центрами тяжести полуфланцев рассчитывается по соотношению

$$b = \frac{4\,(R_н^3 - r_в^3)}{3\pi\,(R_н^2 - r_в^2)}$$

где $R_н = D_н/2$; $r_в = D_в/2$.

В случае опоры цилиндра на дно усилие $P_н$ можно считать сосредоточенным или равномерно распределенным.

4. Усилие на нижнюю поперечину передается в виде равномерно распределенной нагрузки по длине, равной $^2/_3$ расстояния между центрами колонн.

5. Верхняя и нижняя поперечины заменяются брусьями с постоянным моментом инерции по их длине.

Для определения сил, действующих в раме, необходимо построить расчетную схему станины (рис. 3.10, *а*). С целью раскрытия статической неопределенности системы в нее врезаются шарниры *1, 2* и *3*. Для решения используется метод сил (рис.

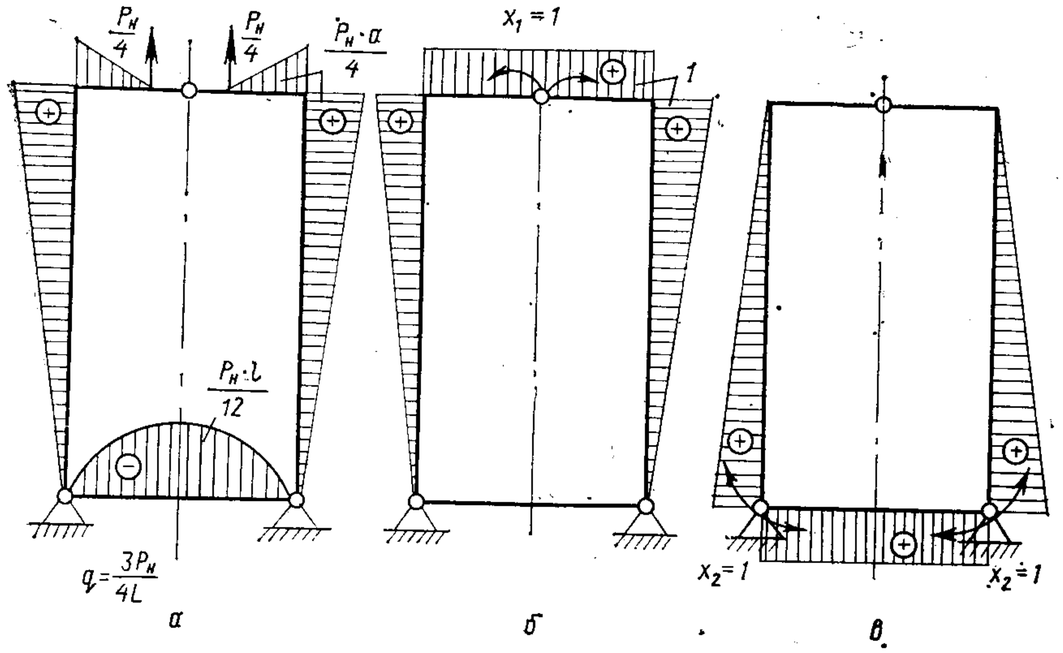


Рис. 3.11. Эпюры изгибающих моментов:
а — от внешней нагрузки; *б* — от момента x_1; *в* — от момента x_2.

3.10, *б)*; проводим определение моментов x_1 и x_2, возникающих в шарнирах. Для этого необходимо построить эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки и от моментов x_1 и x_2 в основной системе (рис. 3.11).

Далее по правилу Верещагина определяем коэффициенты канонических уравнений:

$$\delta_{11} = \frac{H_р}{EI}\left(\frac{2}{3} + 2k_1\frac{l_р}{H_р}\right); \qquad \delta_{12} = \delta_{21} = \frac{H_р}{3EI}$$

$$\delta_{22} = \frac{H_р}{EI}\left(\frac{2}{3} + 2k_2\frac{l_р}{H_р}\right) \tag{3.11}$$

$$\delta_{1р} = \frac{1}{2EI}\left(\frac{P_н a H_р}{3} + k_1 P_н a^2\right)$$

$$\delta_{2р} = \frac{1}{2EI}\left(\frac{P_н a H_р}{3} + \frac{2}{9}k_2 P_н l^2\right)$$

где $H_р$, $l_р$ — высота и ширина рамы; EI — жесткость колонны (стойки) при изгибе; $k_1 = EI/(EI)_1$; $k_2 = EI/(EI)_2$; $(EI)_1$ и $(EI)_2$ — жесткость верхней и нижней поперечин при изгибе соответственно.

Получаем систему канонических уравнений

$$x_1\delta_{11} + x_2\delta_{12} = -\delta_{1р}$$
$$x_1\delta_{21} + x_2\delta_{22} = -\delta_{2р}$$

откуда

$$x_1 = \frac{\delta_{2р}\delta_{12} - \delta_{1р}\delta_{22}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta^2_{12}}$$
$$x_2 = \frac{\delta_{1р}\delta_{12} - \delta_{2р}\delta_{11}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta^2_{12}} \tag{3.12}$$

После подстановки (3.11) в (3.12) получаем

$$x_1 = -\frac{P_н}{2H_р}\,\frac{2k_1a^2\left(1 + 3k_2\frac{l_р}{H_р}\right) + \frac{1}{2}aH_р\left(1 + 4k_2\frac{l_р}{H_р}\right) + \frac{2}{9}k_2l_р^2}{1 + 4(k_1 + k_2)\frac{l_р}{H_р} + 12k_1k_2\frac{l_р^2}{H_р^2}} \tag{3.13}$$

$$x_2 = \frac{P_н}{2H_р}\,\frac{k_1a(a - l_р) + \frac{4}{9}k_2l_р^2\left(1 + 3k_1\frac{l_р}{H_р}\right)}{1 + 4(k_1 + k_2)\frac{l_р}{H_р} + 12k_1k_2\frac{l_р^2}{H_р^2}}$$

Учитывая, что жесткость поперечин может быть принята за бесконечно большую величину, определяем x_1 и x_2 при $k_1 = k_2 = 0$:

$$x_1 = -P_н a/4; \qquad x_2 = 0 \tag{3.14}$$

Следует иметь ввиду, что приведенный расчет применим для случая, когда имеется значительный зазор между направляющими и ползуном (подвижной поперечиной).

Далее определяем напряжения, возникающие в поперечинах под действием изгибающего момента:

$$\sigma = M_{макс}c_т \Big/ \sum I_x^* \tag{3.15}$$

где $M_{макс}$ — максимальное значение изгибающего момента, определяемое по суммарной эпюре моментов, действующих на станину; $c_т$ — координата центра тяжести сечения; ΣI^*_x — момент инерции сечения станины относительно оси x—x, проходящей через центр тяжести поперечины.

Для определения центра тяжести и момента инерции опасного сечения его разбивают на ряд прямоугольников с центрами тяжести, находящимися на пересечении их диагоналей. Центр тяжести приведенного эквивалентного сечения определяют по формуле

$$c_т = \frac{a_1b_1c_1 + a_2b_2c_2 + \ldots + a_ib_ic_i}{a_1b_1 + a_2b_2 + \ldots + a_ib_i} \tag{3.16}$$

где a_1, a_2, ..., a_i — ширина прямоугольников; b_1, b_2, ..., b_i — высота прямоугольников; c_1, c_2, ..., c_i — расстояние от центров тяжести прямоугольников до оси x—x.

Момент инерции прямоугольника относительно горизонтальной оси, проходящей через его центр тяжести, равен

$$I_x = a_i b_i^3/12 \qquad (3.17)$$

Момент инерции каждого i-того прямоугольника относительно оси, проходящей через центр тяжести приведенного сечения, составляет

$$I_{xi}^* = I_{xi} + F_i^2 S_{ci} \qquad (3.18)$$

где F_i — площадь прямоугольника; S_{ci} — расстояние между центрами тяжести прямоугольника и приведенного сечения по оси, перпендикулярной оси x (если они не совпадают).

Тогда момент инерции сечения станины относительно оси x—x составит

$$\sum I_x^* = I_{x1}^* + I_{x2}^* + \ldots + I_{xi}^* \qquad (3.19)$$

Колонны пресса жестко связывают верхнюю и нижнюю поперечины и, кроме того, являются направляющими для ползуна. Для обеспечения необходимой жесткости рамы во время монтажа производится затяжка колонн гайками в поперечинах усилием, превосходящим усилие, воспринимаемое колонной от номинального усилия $P_н$, развиваемого прессом. В связи с этим расчет диаметра колонны в ее наиболее опасном сечении (диаметр резьбы) проводят по формуле

$$d_к = \sqrt{4P_1/(\pi\,[\sigma])} \qquad (3.20)$$

где $P_1 = k_{зт}(P_н/n)$; $k_{зт}$ — коэффициент, учитывающий предварительную затяжку колонн ($k_{зт} = 1{,}2$); n — число колонн; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение в колоннах (для Ст. 5 или низколегированных сталей $[\sigma] = 40 \div 80$ МПа).

Колонны прессов обычно изготавливают с упорной пилообразной резьбой. Шаг резьбы $t_{рк} \approx 0{,}01\ d_к$.

Размер гаек для колонны выбирается из следующих соотношений: высота $h_г = (1 \div 1{,}2)d_к$; наружный диаметр $D_г = 1{,}5d_к$.

Выбранный диаметр $D_г$ должен быть проверен в расчете на смятие по опорной поверхности от усилия P_1. Резьбу колонн рассчитывают на смятие и изгиб витков.

Подвижные поперечины (плиты) и ползуны изготавливаются литыми или сварными из стали. Сечения поперечин выполняют коробчатым или балочным с большим количеством ребер, препятствующих возникновению местных напряжений.

Расчет подвижной поперечины (или ползуна) аналогичен расчету поперечин рамы. При этом предполагается, что плита укреплена в направляющих и нагружена по диаметру плунжера распределенной нагрузкой от $P_н$. Расчет проводится аналогично расчету на изгиб балки, закрепленной в двух опорах.

Нормы точности для гидравлических прессов, касающиеся требований по плоскостности и параллельности рабочих поверхностей плит пресса и перпендикулярности хода ползуна к поверхности стола, приведены в ГОСТ 10319—74.

3.3.2. Гидроцилиндры

Конструкция гидроцилиндра (рис. 3.12) выбирается с учетом конструктивной схемы пресса, рабочего давления жидкости, усилия прессования, условий работы. Различают поршневые, плунжерные, простые и дифференциальные цилиндры. В поршневых цилиндрах (рис. 3.12, *а*) энергия движущейся жидкости преобразуется в механическую энергию движущегося поршня со штоком. В плунжерных цилиндрах имеется движущийся плунжер (рис. 3.12, *б*). Диаметр поршня $D_п$ больше диаметра штока $d_ш$; поршень сопрягается с внутренней поверхностью цилиндра по посадочному размеру. Плунжер имеет по всей длине одинаковый диаметр $D_{пл}$, меньший внутреннего диаметра цилиндра $D_в$, и сопрягается лишь с сальниковым уплотнением в крышке; при этом отпадает необходимость в точной обработке внутренней поверхности цилиндра.

Цилиндры подразделяются на простые (рис. 3.12, *а*) и дифференциальные (рис. 3.12, *в*). В первых поршень имеет одинаковые скорости прямого и обратного хода и снабжен двухсторонним штоком. Во вторых поршни развивают различные усилия и скорости при прямом и обратном ходах. С целью реализации обратного хода на плунжерных системах устанавливают кроме

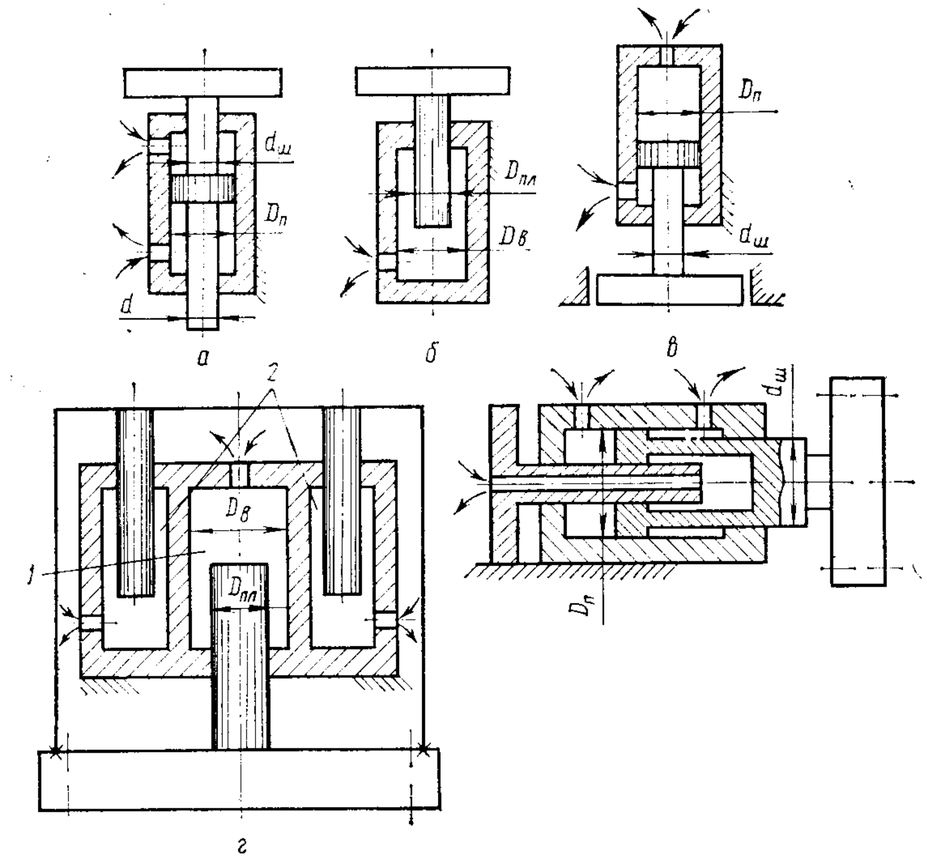
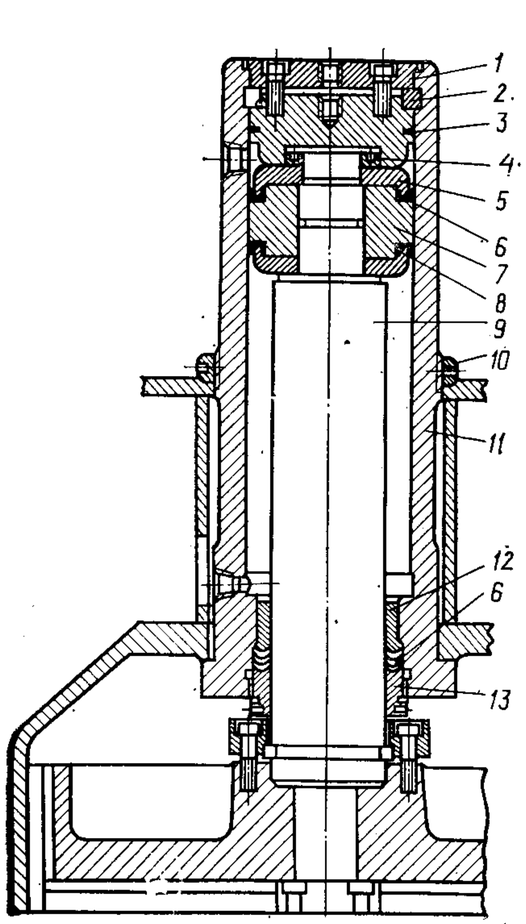


Рис. 3.12. Схемы гидравлических цилиндров прессов. Пояснения в тексте.

основного цилиндра *1* дополнительные цилиндры *2*, которые называют возвратными (рис. 3.12, *г*). Иногда находят применение ступенчатые цилиндры (рис. 3.12, *д*), в которых реализуется несколько скоростей за счет комбинации дифференциальных поршней с плунжерами.

Конструкция узла гидроцилиндра поршневого типа (рис. 3.13) состоит из корпуса *11*, крышки *1*, поршня *7* с крышками *5* и штоком *9* и направляющей втулкой *12*, уплотнений *6* и *8* и грундбуксы *13*. Крышка скрепляется с корпусом посредством разрезного кольца *2*, вкладываемого в паз корпуса и опорной пяты *3*. Поршень укрепляется на штоке гайкой *4*. Цилиндр соединяется со станиной резьбовым кольцом *10*.

Узел гидроцилиндра плунжерного типа (рис. 3.14) состоит из цилиндра *1*, укрепленного на станине *3*, плунжера *2*, уплотнения *4* с грундбуксой *5*. Соединение плунжера с подвижной



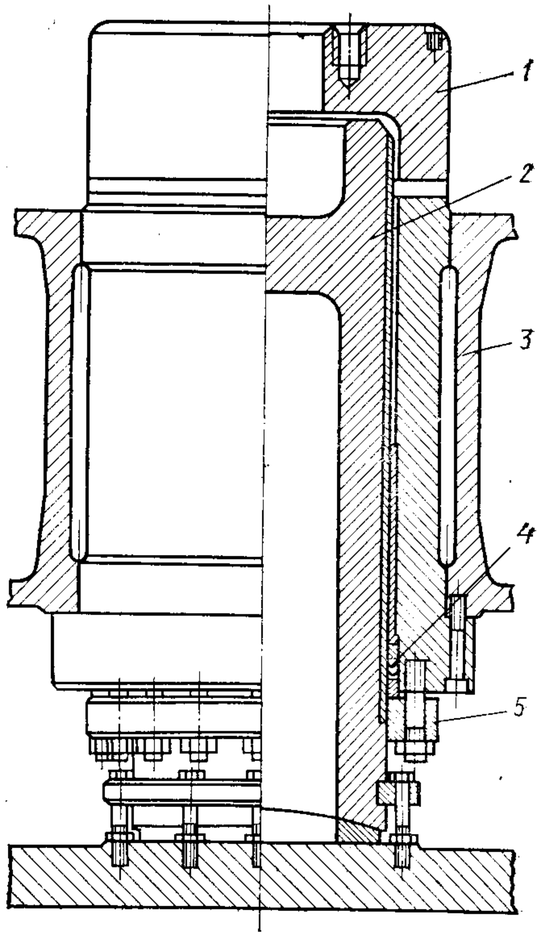
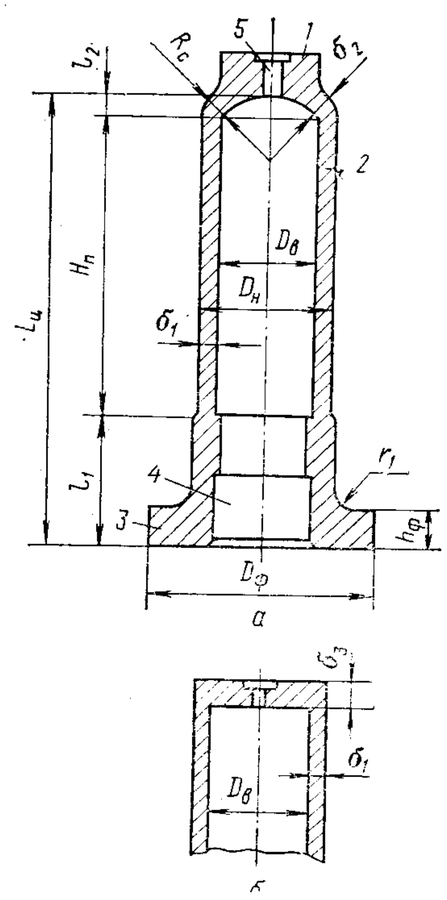


Рис. 3.13. Узел главного цилиндра гидравлического пресса поршневого типа: *1* — крышка цилиндра; *2* — разрезное кольцо; 3 — опорная пята; *4* — гайка; *5* — крышки поршня; *6*, *8* — уплотнения; *7* — поршень; *9* — шток; *10* — резьбовое кольцо; *11* — корпус цилиндра; *12* — направляющая втулка; *13* — грундбукса.

Рис. 3.14. Узел главного цилиндра гидравлического пресса плунжерного типа: *1* — цилиндр; *2* — плунжер; *3* — станина; *4* — уплотнение; *5* — грундбукса.

Рис. 3.15. Схема гидроцилиндра пресса со сферическим (*а*) и с плоским (*б*) днищем: *1* — днище; *2* — цилиндрическая часть; *3* — опорный фланец; *4* — расточка под уплотняющую втулку и уплотнение; *5* — отверстие для крепления трубопровода.



плитой (ползуном, поперечиной) осуществляется с помощью болтов *6*.

Гидроцилиндр является наиболее нагруженным и ответственным узлом пресса, в значительной степени определяющим его эксплуатационные качества. Корпус гидроцилиндра выполняют чаще всего из стали 35. Для рабочих давлений до 20 МПа используют литые цилиндры. Широко применяются цилиндры, полученные механической обработкой из поковок. Трудоемкость изготовления гидроцилиндра снижается при использовании цилиндров с приварным днищем.

Гидроцилиндр состоит из следующих основных элементов (рис. 3.15): днища *1*, цилиндрической части *2*, опорного фланца *3*, расточки под направляющую втулку и уплотнение *4*. В днище имеется отверстие *5* с проточкой для крепления трубопровода рабочей жидкости. Днище может быть изготовлено отдельно и может крепиться к цилиндру на резьбе, болтах, с помощью разрезной кольцевой шпонки. Внутренняя поверхность цилиндра изготавливается по 2—3 классам точности при шероховатости поверхности по 7—9 классам.

ГОСТ 16514—70 регламентирована техническая характеристика гидроцилиндров, включающая наименование и тип цилиндра, назначение и условия применения, рекомендуемые виды рабочей жидкости, габаритные и присоединительные размеры и ряд других параметров. По ГОСТ 6540—68 следует выбирать диаметры цилиндров, поршней, плунжеров, штоков, ход плунжера и ряды номинальных давлений, на которые могут быть рассчитаны гидроцилиндры. ГОСТ 6540—68 установлен следующий ряд внутренних диаметров гидроцилиндров: 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800 и 1000 мм. Для диаметров штоков основной ряд по ГОСТ 6540—68 следующий: 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800 мм.

При проектировании гидроцилиндра исходными данными являются: усилие $P_н$, давление рабочей жидкости $p_г$, допускае-

мое напряжение на растяжение [σ] для металла, из которого изготавливается гидроцилиндр. По формуле (3.4) определяется диаметр плунжера (поршня), значение которого округляется до ближайшего большего по ГОСТ 6540—68. В зависимости от конструктивных особенностей гидроцилиндра, наличия в нем плунжера или поршня по этому же ГОСТ находится внутренний диаметр цилиндра $D_в$, диаметр штока $d_ш$ и ход плунжера $H_п$.

Наружный диаметр $D_н$ гидроцилиндра (см. рис. 3.15) находят из соотношения, полученного в теории расчета толстостенных сосудов, работающих под внутренним давлением:

$$R_н/R_в \geqslant 1{,}5$$

где $R_н$ и $R_в$ — наружный и внутренний радиусы цилиндра.

В стенках цилиндра, опирающегося на фланец (см. рис. 3.15), при работе возникают радиальные σ_r, тангенциальные σ_t и осевые σ_z напряжения. Напряжения σ_r, σ_t, σ_z могут быть определены для любой точки с координатой r по формуле Ламе:

$$\sigma_r = \frac{p_г R_в^2}{R_н^2 - R_в^2}\left(1 - \frac{R_н^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_t = \frac{p_г R_в^2}{R_н^2 - R_в^2}\left(1 + \frac{R_н^2}{r^2}\right) \qquad (3.21)$$

$$\sigma_z = p_г R_в^2/(R_н^2 - R_в^2)$$

Напряжения σ_z и σ_t имеют максимальное значение на внутренней стенке цилиндра при $r = R_в$. В соответствии с энергетической теорией прочности эквивалентное напряжение находим по формуле

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]} \leqslant [\sigma] \qquad (3.22)$$

Получив из (3.21) максимальные значения σ_z, σ_r, σ_t при $r = R_в$ и подставив их в (3.22), получим формулу для расчета $D_н$ стальных цилиндров:

$$D_н = D_в\sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - 1{,}73p_г}} \qquad (3.23)$$

Толщина стенки цилиндра δ_1 может быть определена следующим образом:

$$\delta_1 = \frac{1}{2}D_в\left(\sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - 1{,}73p_г}} - 1 + c_п\right) \qquad (3.24)$$

где $c_п$ — припуск на проточку при ремонте цилиндра, часто $c_п = 0$.

При расчете цилиндра, который крепится не на фланце, а с опорой на дно, учитывают, что при этом $\sigma_z = 0$, и формула

(3.23) видоизменяется:

$$D_н = D_в\sqrt{\frac{[\sigma]^2 p_г \sqrt{4[\sigma]^2 - 3p_г^2}}{[\sigma]^2 - 3p_г^2}} \qquad (3.23а)$$

Марка стали для изготовления цилиндра выбирается с учетом рабочего давления в гидросистеме пресса, технологии изготовления и конструкции цилиндра. Для кованых цилиндров коэффициент запаса прочности $n = 2{,}7 \div 2{,}9$, для литых $n = 3 \div 3{,}5$ по отношению к пределу текучести.

Сферические днища гидроцилиндра имеют толщину $\delta_2 = (1 \div 1{,}3)\ \delta_1$ с радиусом сферы $R_с = (1 \div 1{,}2)\ R_в$. Толщина плоского днища δ_3 может быть рассчитана по формуле

$$\delta_3 = \sqrt{p_г R_в^2/(\psi[\sigma])} \qquad (3.25)$$

где ψ — коэффициент, учитывающий ослабление днища отверстием для подвода жидкости ($\psi = 0{,}7 \div 0{,}8$).

Глубина цилиндра $L_ц$ может быть определена по формуле

$$L_ц = H_п + l_1 + l_2 \qquad (3.26)$$

где $H_п$ — ход поршня; l_1 — длина проточек под направляющую втулку и уплотнение; l_2 — глубина сферической части днища.

Переходную часть цилиндра к фланцу выполняют со скруглением $r_1 = (0{,}15 \div 0{,}2)\ \delta_3$. Наружный диаметр фланца $D_ф$ может быть определен по следующей формуле, полученной из условия достижения допускаемого напряжения смятия опорных поверхностей фланца:

$$D_ф = \sqrt{\frac{4P_н + [\sigma_см] D_н^2 \pi}{\pi[\sigma_см]}} \qquad (3.27)$$

где $[\sigma_см]$ — допускаемое напряжение смятия, равное 80—100 МПа.

Высота фланца зависит от толщины стенки цилиндра и должна приниматься равной

$$h_1 \approx 1{,}5(R_н - R_в) \qquad (3.28)$$

3.3.3. Плунжеры

Основное назначение плунжера — передача усилия прессования на подвижную поперечину. Конструкция крепления плунжера к поперечине зависит от способа и места приложения нагрузки. Жесткое соединение с помощью винта, фланца и т. д. допускается при строго центральном направлении действия усилия прессования. При внецентренном нагружении жесткое крепление плунжера к плите недопустимо, так как при этом плунжер не только сжимается от усилия прессования, но и дополнительно нагружается изгибающим моментом сил трения подвижной поперечины о направляющие. В этом случае используются различные конструкции подвижных опор с шаровым шарниром.

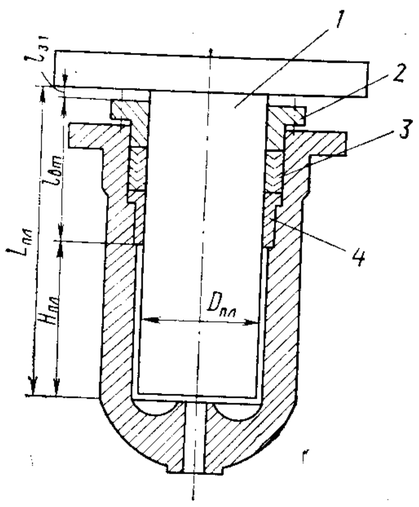


Рис. 3.16. Схема плунжера с уплотнением:
1 — плунжер; *2* — грундбукса; *3* — уплотнение; *4* — направляющая втулка.

Плунжеры малого диаметра (до 200—250 мм) выполняются сплошными из углеродистой или хромомолибденовой стали. Плунжеры большого диаметра часто изготавливаются пустотелыми с полостью, обращенной в сторону цилиндра. При этом заглушка на отверстие полости не ставится, чтобы посторонние включения, попадающие в гидроцилиндр с рабочей жидкостью, оседали на дно полости, а не попадали на его рабочую поверхность, вызывая абразивный износ.

Плунжеры обычно изготавливаются коваными или литыми с последующей обработкой рабочей поверхности до шероховатости не ниже 9 класса с последующим хромированием. Твердость рабочей поверхности должна достигать HRC 35—40.

Длина плунжера $L_{пл}$ может быть вычислена по следующей формуле (рис. 3.16):

$$L_{пл} = H_{пл} + l_{вт} + l_{зп} \qquad (3.29)$$

где $H_{пл}$ — ход плунжера; $l_{вт}$ — длина направляющей втулки, уплотнения, грундбуксы; $l_{зп}$ — зазор между подвижной поперечиной и грундбуксой при опоре плунжера на днище цилиндра ($l_{зп} \approx 5 \div 15$ мм).

Направляющая втулка изготавливается из бронзы, чугуна, металлополимеров и других антифрикционных материалов и служит для обеспечения контакта между трущимися поверхностями плунжера и гидроцилиндра.

3.3.4. Уплотнения подвижных и неподвижных соединений

Уплотнения служат для предотвращения проникновения рабочей жидкости, находящейся под давлением, из одной смежной полости в другую и для защиты гидравлической системы или отдельных ее деталей от влияния окружающей среды. В прессовом оборудовании используются различные типы уплотнений: для подвижных и неподвижных деталей, разъемные и неразъемные. Уплотнение должно отвечать следующим требованиям: обеспечивать необходимую герметичность при долговременной эксплуатации, не вызывать износа трущихся металлических поверхностей, обладать стойкостью к воздействию повышенных температур, быть инертным по отношению к металлу сопряженных деталей и рабочих жидкостей.

Уплотнения подвижных соединений в прессовом оборудовании располагаются в местах сопряжения гидроцилиндров с деталями, совершающими возвратно-поступательное движение: поршнями, плунжерами, штоками. Наиболее распространенные уплотнения подвижных соединений — манжетные, в виде упругих уплотнительных колец, сальниковые — обеспечивают надежную герметизацию за счет непосредственного контакта с поверхностью уплотнения.

Манжетные уплотнения относятся к типу самоуплотняющихся под действием давления рабочей жидкости, находящейся в уплотняемой емкости (гидроцилиндре). Рабочая жидкость расклинивает манжету и прижимает ее борт к уплотняемой поверхности.

Профили сечения этих уплотнений различны: уголковые, U-образные, *V*-образные (шевронные). Размеры и формы профилей регламентированы ГОСТ 6678—72, ГОСТ 6969—54 и ГОСТ 9041—59. Манжеты изготавливают из прорезиненных и графитизированных тканей, маслостойких резин, поливинилхлоридных пластикатов. Кожа растительного и хромового дубления малоэффективна в качестве материала уплотнений для прессов, так как она разрушается от контакта с рабочими жидкостям — минеральными маслами.

К числу наиболее употребительных относятся однорядные U-образные манжеты и многорядные манжеты шевронного типа. Они изготавливаются методом горячего прессования или литья под давлением. Однорядные манжеты (рис. 3.17) имеют плоские днища и борта треугольной формы. Уплотнение осуществляется за счет прижатия вершин треугольников («усов») к уплотняемой подвижной поверхности. Предварительное прижатие «уса» манжеты *1* к поверхности происходит за счет нажимного кольца-вкладыша *2*. Манжета подбирается по номинальному диаметру плунжера (штока) $D_{пл}(d_ш)$. На рис. 3.17

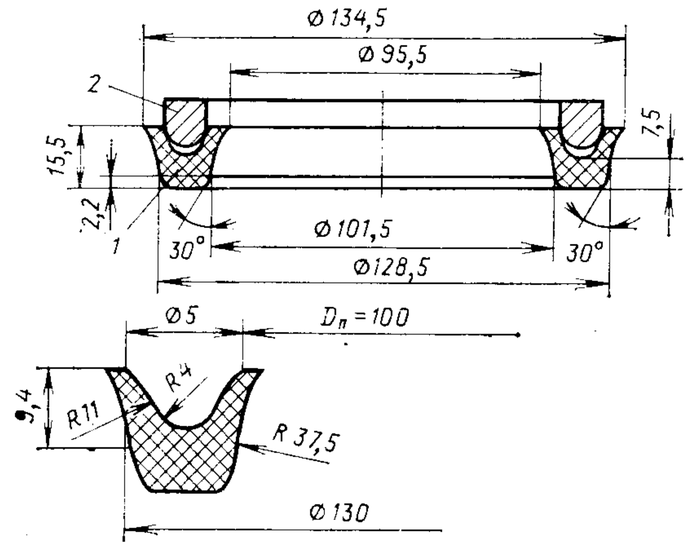


Рис. 3.17. Манжета воротниковая:
1 — манжета; *2* — вкладыш.

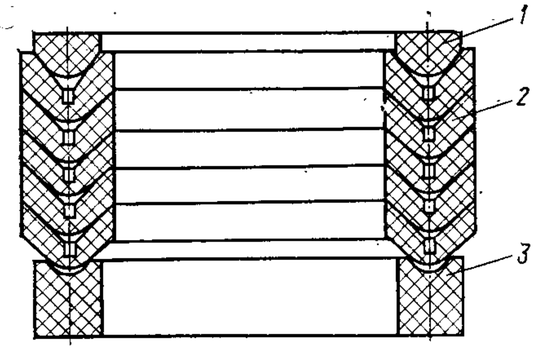


Рис. 3.18. Манжеты шевронные:
1 — нажимное кольцо; *2* — шевронное кольцо; *3* — опорное кольцо.

показаны размеры манжет для $D_{пл}=100$ мм по ГОСТ 6969—54.

Многорядные шевронные манжеты (рис. 3.18) используются для набивки сальников штоков (плунжеров). Комплект состоит из одного нажимного кольца *1*, нескольких шевронных колец *2* и опорного кольца *3*. Эти уплотнения изготавливают из хлопчатобумажной ткани, покрытой с двух сторон резиновой смесью с добавлением графита. Срок службы их в три раза больше срока службы манжет, изготовленных из маслостойкой резины или из поливинилхлорида. Число шевронных колец в пакете (от 3 до 10) выбирается в зависимости от давления рабочей жидкости и диаметра плунжера по ГОСТ 2041—59. Уголковые манжеты находят применение в поршневых системах, работающих с длительными перерывами.

Схема установки шевронных манжетных уплотнений показана на рис. 3.13 и 3.14.

В некоторых случаях, например, если есть возможность легко вынуть плунжер из цилиндра, целесообразно использовать закладные однорядные манжеты (рис. 3.19), употребляющиеся без нажимных и опорных колец. Для установки этой манжеты в теле цилиндра делают проточку, в которую запрессовывают манжету. Манжета удерживается за счет упругой деформации резинового кольца, находящегося между наружным и внутренним бортами манжеты.

Упругие уплотнительные резиновые кольца применяются для уплотнения поверхностей деталей с возвратно-поступательным или вращательным характером движения. Упругие неразрезные резиновые кольца устанавливаются в проточки (канавки) прямоугольного поперечного сечения. Под влиянием перепада давления рабочей жидкости кольцо упруго деформируется и создает необходимое уплотнение. В ГОСТ 9833—61 приводятся необходимые размеры колец, уплотняемых деталей, канавок и зазоров для упругих резиновых колец круглого сечения, применяемых при давлении рабочей жидкости до 20 МПа. Находят промышленное применение и уплотнительные резиновые кольца: О-образные, Х-образные, D-образные, Δ-образные и Т-образные (рис. 3.20).

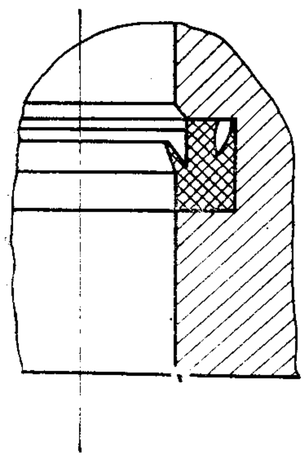


Рис. 3.19. Манжета закладная.

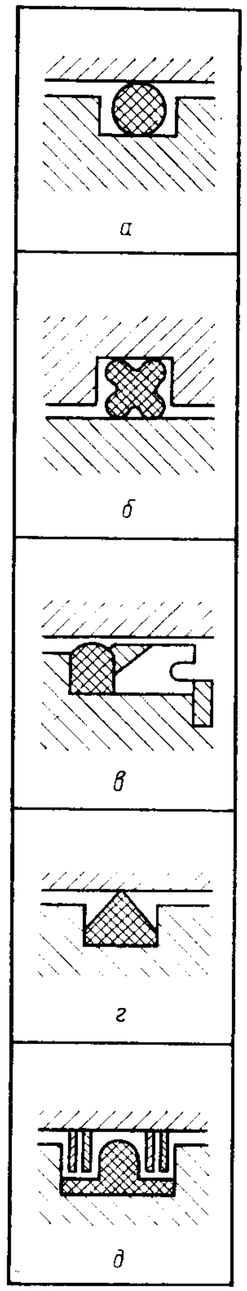


Рис. 3.20. Упругие резиновые уплотнительные кольца:
а — О-образные; *б* — Х-образные; *в* — D-образные; *г* — Δ-образные; *д* — Т-образные.

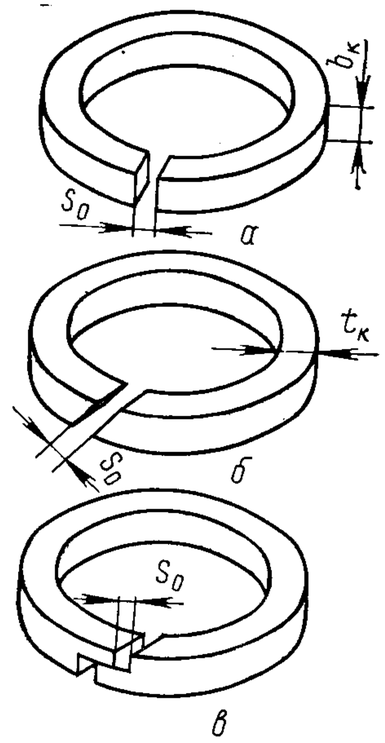


Рис. 3.21. Поршневые упругие кольца:
а — замок с прямым стыком; *б* — замок с косым стыком; *в* — замок со ступенчатым стыком.

Упругие разрезные металлические уплотнения (поршневые кольца) являются универсальным средством уплотнения поршней диаметром до 200 мм; они изготавливаются из чугуна марок СЧ 21—40 и СЧ 24—44, а для больших диаметров — из чугуна СЧ 18—36. После термической обработки твердость кольца должна быть на 5—10 единиц меньше твердости внутренней поверхности цилиндра. Поршневые кольца имеют прямоугольное сечение и помещаются в специальных канавках-проточках на поршне.

Число устанавливаемых поршневых колец (рис. 3.21) — от 2 до 8 — зависит от вида рабочей жидкости, перепада давления, диаметра поршня. Геометрические размеры колец выбирают по следующим соотношениям:

$$D_в/t_к = 20 \div 30; \qquad b_к = (1 \div 1{,}2)\, t_к \qquad (3.30)$$

где $D_в$ — внутренний диаметр цилиндра; $b_к$ — ширина кольца; $t_к$ — толщина кольца.

При давлении до 5 МПа рекомендуется применять прямой стык в замке кольца (рис. 3.21, *а*), при давлении свыше 5 МПа — косой стык под углом 45—60° (рис. 3.21, *б*). Применение косого, а также ступенчатого (рис. 3.21, *в*) стыков в замке кольца способствует уменьшению утечек рабочей жидкости через зазор в замке S_0, равный при обычной температуре 0,1—0,6 мм.

Употребление поршневых колец усложненной конструкции (сдвоенных и строенных) также уменьшает утечки через зазоры замка и радиальный зазор между поршнем и кольцом.

Уплотнения для неподвижных соединений бывают в основном двух типов: с прокладками и без прокладок. Действие прокладочных уплотнений основано на пластической деформации материала прокладки — кожи, резины, фторопласта, асбеста, фибры и других мягких материалов. С целью повышения герметичности соединений прокладки пропитываются парафином, маслом, олифой с добавлением графита. Часто используются комбинированные прокладки, в которых мягкий материал вмонтирован в металлический корпус, а также металлические прокладки из мягких металлов (отожженной красной меди, свинца, алюминия и др.). Прокладки выполняются плоскими, а также в виде колец круглого, квадратного, прямоугольного, трапецеидального и трубчатого сечения.

Выточки под прокладки, а также торцевые поверхности труб и фланцев, соприкасающиеся с прокладками, должны быть тщательно обработаны. Расчет болтов фланцевого соединения, работающего с прокладкой, производят по давлению на прокладку, равному удвоенному рабочему давлению жидкости в трубопроводе $p_г$.

Уплотнение неподвижных соединений без прокладок может быть достигнуто за счет точной пригонки уплотняемых деталей, скрепляемых затем болтами или другими резьбовыми соединениями.

3.3.5. Нагревательные плиты

Нагревательные плиты являются основным технологическим элементом, передающим прессуемому материалу давление и необходимое количество тепла. Конструктивно нагревательные плиты представляют собой плоские массивные стальные плиты с расположенной внутри системой каналов, по которым циркулирует теплоноситель. В систему нагрева, охлаждения и регулирования температуры входят помимо нагревательных плит подвижный трубопровод для подвода теплоносителя к подвижным плитам пресса, распределительная и регулирующая аппаратура.

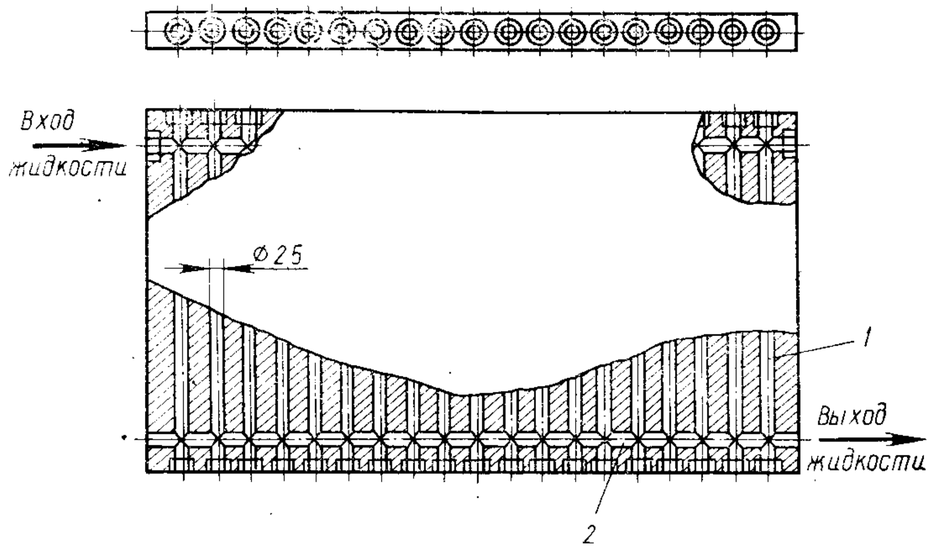


Рис. 3.22. Нагревательная плита:
1 — нагревательный канал; *2* — соединительный канал.

На рис. 3.22 представлена конструкция нагревательной плиты многоэтажного специализированного пресса для производства стеклопластиков. Система каналов для теплоносителя, с помощью которого нагреваются и охлаждаются плиты, образуется рядом параллельных сверленых нагревательных каналов *1*, соединенных друг с другом соединительными каналами *2*. Нагревательные каналы сверлят на многошпиндельных агрегатных станках сверлами диаметром 25 мм.

Важным условием для получения высококачественных изделий при прессовании является равномерность давлений на поверхности плит, что в первую очередь зависит от их жесткости и точности механической обработки. Для переработки материалов, требующих давлений прессования до 5 МПа, применяют нагревательные плиты толщиной 40—45 мм, требующих давлений прессования свыше 5 МПа — плиты толщиной 65—70 мм. Поверхность плит выполняется по 6—7 классу шероховатости.

Нагрев материала в прессах, оснащенных нагревательными плитами, происходит за счет пара, жидких теплоносителей, а также с помощью электронагревателей. Нагрев насыщенным паром обеспечивает более равномерное температурное поле плит, чем нагрев водой. Но недостатком насыщенного пара является то, что для роста температуры его насыщения необходимо повышать давление. Так, для получения насыщенного пара при температуре 473—523 К требуется давление до 4 МПа.

В качестве жидких теплоносителей применяют перегретую воду, а также некипящие (минеральные масла, глицерин, хло-

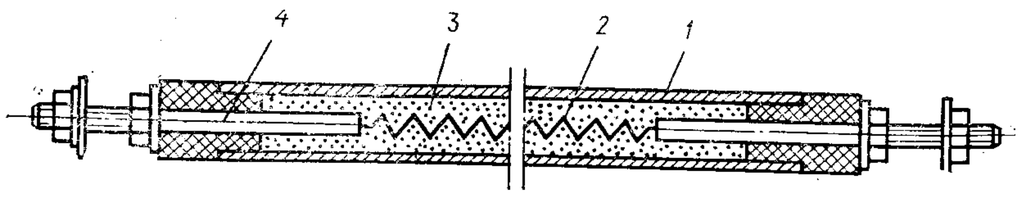


Рис. 3.23. Трубчатый электронагреватель сопротивления:
1 — металлическая труба; *2* — нихромовая спираль; *3* — песок; *4* — шпилька.

ристый дифенил) и высококипящие (нафталин, диталилметан ДТМ и т. д.) жидкости. В прессах применяется принудительная циркуляция теплоносителя.

Более высокие температуры плит достигаются при использовании электрических нагревателей. В настоящее время наиболее распространены трубчатые электронагреватели сопротивления ТЭН, что позволяет сохранить конструкцию плиты, применяемую для парового и водяного нагрева.

Трубчатый электронагреватель (рис. 3.23) представляет собой металлическую трубу *1*, внутри которой находится нагревательная нихромовая спираль *2*. Пространство трубы вокруг спирали заполнено чистым кварцевым песком *3* или периклазом (порошкообразным плавленным оксидом магния). Вводы спирали выполнены в виде шпилек *4*, выступающих за торец нагревателей. В нагревательных плитах, а также в пресс-формах используются электронагреватели прямой и U-образной формы.

Индукционный нагрев плит используется редко, так как при нем возникает большая неравномерность температурного поля плиты из-за трудности рационального с точки зрения равномерности нагрева размещения индуктора.

3.4. ГИДРОПРИВОД ПРЕССА

Наиболее значительным признаком классификации прессов является вид привода. По этому признаку различают следующие типы привода: индивидуальный насосный безаккумуляторный, индивидуальный насосно-аккумуляторный и групповой насосно-аккумуляторный.

Наиболее распространен *индивидуальный насосный безаккумуляторный привод*, к основным преимуществам которого относится простота конструкции и удобство размещения на прессе, простота регулирования давления и высокий к. п. д.

Индивидуальный гидропривод пресса включает в себя объемный насос, объемный гидродвигатель, бак для рабочей жидкости и магистральную линию с органами управления, распределения, регулирования и защиты. Объемный насос преобразует энергию электродвигателя в потенциальную и кинетическую

энергию рабочей жидкости путем периодического изменения объема камеры, занимаемой жидкостью. Объемный гидродвигатель преобразует энергию жидкости в механическую энергию. Гидродвигатели могут быть с возвратно-поступательным движением рабочих органов (гидроцилиндры) и с вращательным движением (гидромоторы). Последние не используются в прессостроении, они нашли применение в червячных экструдерах и литьевых машинах.

Применение накопителей рабочей жидкости, находящейся под давлением (аккумуляторов), в индивидуальном гидроприводе целесообразно в том случае, когда для получения высоких скоростей смыкания плит требуется большая мощность привода и в то же время длительные выдержки в цикле прессования позволяют аккумулировать энергию при сравнительно небольшой мощности гидронасоса. Насосно-аккумуляторный привод часто используется для обслуживания нескольких прессов. Целесообразность устройства группового насосно-аккумуляторного привода определяется несовпадением моментов отбора жидкости прессами, присоединенными к данной насосно-аккумуляторной станции.

3.4.1. Рабочие жидкости

В прессах в качестве рабочих жидкостей применяются минеральные масла и их смеси. При групповом приводе используются вода или водная эмульсия. К рабочим жидкостям предъявляются следующие требования: 1) безопасность для здоровья людей самой жидкости и ее паров; 2) пожаробезопасность; 3) инертность к используемым в системе материалам, включая металлы, красители, пластмассы; 4) оптимальная вязкость и ее незначительные изменения в рабочем диапазоне температур и давлений; 5) малая способность к поглощению и растворению воздуха, малая склонность к вспениванию; 6) низкая сжимаемость.

Рабочими жидкостями в индивидуальном гидроприводе служат следующие очищенные минеральные масла: индустриальное (веретенное) различных марок, турбинное различных марок, цилиндровое. Важнейшим показателем физических свойств масла является его вязкость, измеряемая в настоящее время в градусах условной вязкости (°ВУ). Эта вязкость измеряется на капиллярном вискозиметре Оствальда — Пинкевича и представляет собой отношение времени истечения 200 см³ масла через капилляр диаметром 2,8 мм ко времени истечения через этот же капилляр такого же количества воды. При использовании низковязких жидкостей (вязкость до 2 °ВУ) в конструкции гидропривода необходимо обеспечивать особо тщательное уплотнение рабочих узлов, предотвращающее утечки масла через зазоры в подвижных и неподвижных соединениях.

3.4.2. Типы насосов для индивидуального и группового гидроприводов

Техническую характеристику любого насоса образуют следующие основные параметры: рабочий объем (см³/об), номинальное давление (МПа), номинальная производительность (л/мин), номинальная частота вращения (об/мин), мощность двигателя (кВт). При проектировании гидропривода пресса параметры технической характеристики насосной установки выбирают с учетом параметров технологического процесса прессования и циклограммы пресса (см. разд. 3.1.1). Для этого определяют необходимое усилие прессования и скорости рабочего и холостого ходов подвижной поперечины (ползуна) на каждой операции цикла прессования.

Производительность насоса $Q_н$ (м³/мин), необходимая для реализации заданной скорости движения плунжера пресса, определяется по формуле

$$Q_н = 60 k_с \frac{\pi D_п^2}{4} V_п \qquad (3.31)$$

где $k_с$ — коэффициент, учитывающий утечки и сжимаемость жидкости ($k_с = 0{,}95 \div 0{,}97$); $D_п$ — диаметр плунжера, м; $V_п$ — скорость движения плунжера, м/с.

Необходимую мощность привода насоса при заданном номинальном усилии пресса $P_н$ и скорости прессования $V_п$ определяют по формуле

$$W = \frac{P_н V_п}{\eta_п} \cdot 10^{-3} \qquad (3.32)$$

где $\eta_п$ — к. п. д. привода ($\eta_п = 0{,}75$).

В гидравлических прессах находят применение насосы многих видов и конструкций. Для получения давления до 10 МПа применяются пластинчатые (лопастные), шестеренчатые, центробежные насосы, свыше 10 МПа — различные типы плунжерных насосов.

Рассмотрим конструкцию наиболее распространенного в прессостроении *лопастного насоса* для создания давления не более 7—10 МПа. Этот тип насоса отличается относительно высокой объемной производительностью (до 150 л/мин) и используется для осуществления ускоренного холостого (или обратного) хода подвижной поперечины. Лопастной (пластинчатый) сдвоенный насос типа 8Г12-25А (рис. 3.24) состоит из собранных в общем корпусе *10* двух ординарных насосов одинаковой конструкции. В каждом насосе между крышкой *1* и корпусом *10* закреплено стальное кольцо — статор *5* с профилированной поверхностью, по которой скользят двенадцать пластин *12*, перемещающихся в пазах ротора *6*. Последний вращается на шлицевом валу *3* с подшипниками *2* и *9*. К торцам статора и ротора

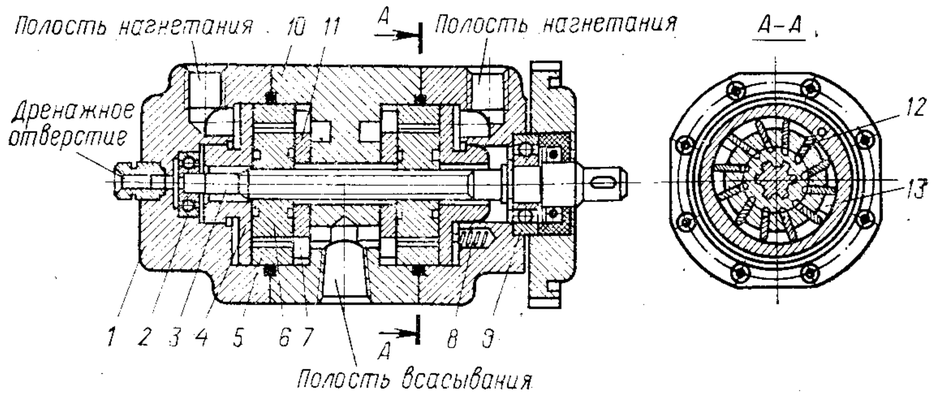


Рис. 3.24. Лопастной (пластинчатый) сдвоенный насос типа 8Г 12-25А:
1 — крышка; *2*, *9* — подшипники; *3* — шлицевой вал; *4*, *11* — распределительные диски; *5* — статор; *6* — ротор; *7* — окно для всасывания жидкости; *8* — пружина; *10* — корпус; *12* — пластина; *13* — окно для нагнетания жидкости.

прижаты с помощью пружин *8* распределительные диски *4* и *11*, в которых сделаны два окна *7* для всасывания и два окна *13* для нагнетания жидкости. При вращении ротора пластины *12* прижимаются к внутренней поверхности статора. Камеры, образуемые двумя соседними лопастями, во время прохождения через зону всасывания увеличиваются в объеме и заполняются жидкостью через окна *7*. При перемещении в зону нагнетания объем камеры уменьшается, и масло вытесняется через окна *13* в магистраль нагнетания. За один оборот ротора производятся два цикла нагнетания и всасывания.

Шестеренчатые и *центробежные насосы* применяются в гидроприводе прессов чаще всего для вспомогательных целей — наполнения баков, подпитки насосов высокого давления, управления работой пресса.

Различные типы *плунжерных насосов* (эксцентриковые, ротационные, кривошипные) имеют много конструктивных разновидностей. Плунжерные кривошипные насосы применяются главным образом в насосно-аккумуляторном приводе с объемным расходом рабочей жидкости до 1000 л/мин при давлении до 32 МПа. Ротационно-плунжерные насосы работают преимущественно в системах безаккумуляторного привода с объемным расходом жидкости до 200 л/мин при давлении до 20 МПа. Эксцентриковые плунжерные насосы нашли применение в индивидуальном гидроприводе высокого давления (до 50 МПа) и способны обеспечивать объемную производительность рабочей жидкости до 350 л/мин.

Конструкция одного из распространенных эксцентриковых плунжерных насосов типа Н 403 представлена на рис. 3.25. Она состоит из корпуса *1*, внутри которого помещен вал *2* с тремя эксцентриками, смещенными один относительно другого на 120°; на них насажены игольчатые обоймы *3*. При вращении вала эксцентрики перемещают плунжеры *5*, внутри которых помещаются всасывающие клапаны *4*. Всасывание обеспечивается

пружиной *6*. Степень открытия клапана определяется возвышением хвостовой части клапана над опорным (для пружины) выступом. Усилие через обойму, клапан и плунжер передается на жидкость, которая вытесняется через нагнетательный клапан *7*.

3.4.3. Аккумуляторы

Используемый в насосно-аккумуляторном приводе накопитель энергии рабочей жидкости — аккумулятор запасает жидкость высокого давления во время пауз в работе прессов и в периоды пониженного расхода и отдает ее в моменты, когда потребление жидкости превосходит подачу ее насосами. В зависимости от способа поддержания давления аккумуляторы подразделяются на грузовые, воздушно-поршневые и воздушно-беспоршневые. Основными параметрами технической характеристики любого аккумулятора по ГОСТ 14064—68 являются номинальное давление и номинальная емкость.

Грузовые аккумуляторы несложны в устройстве и управлении, однако имеют ряд существенных недостатков. Они громоздки и в них при резком торможении больших движущихся масс жидкости могут возникать гидравлические удары.

Преимуществом *воздушно-поршневого* аккумулятора является отсутствие непосредственного контакта жидкости с воздухом или газом (азотом), что предотвращает образование в аккумуляторе взрывоопасной смеси масла с воздухом (газом). Эти

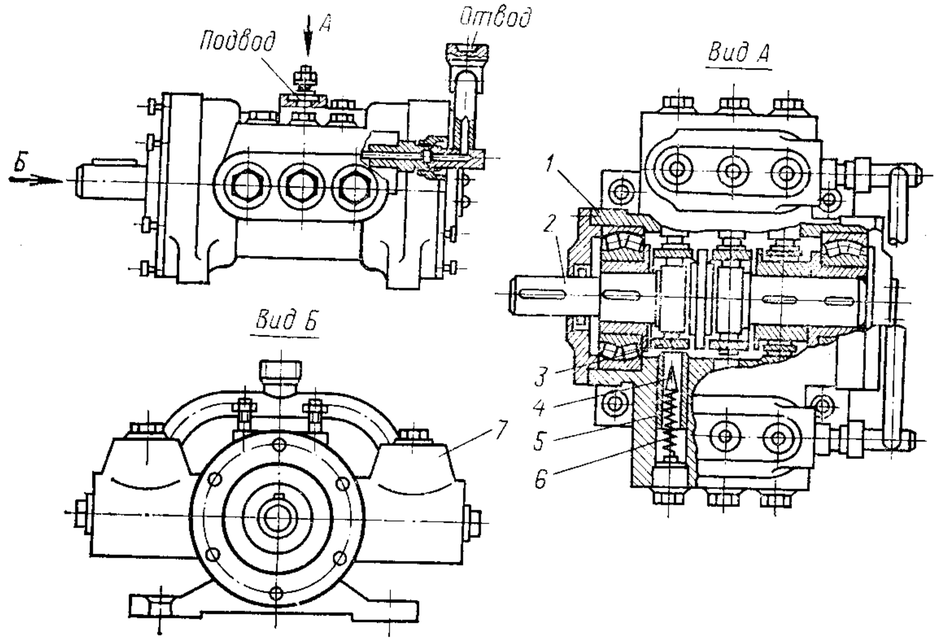
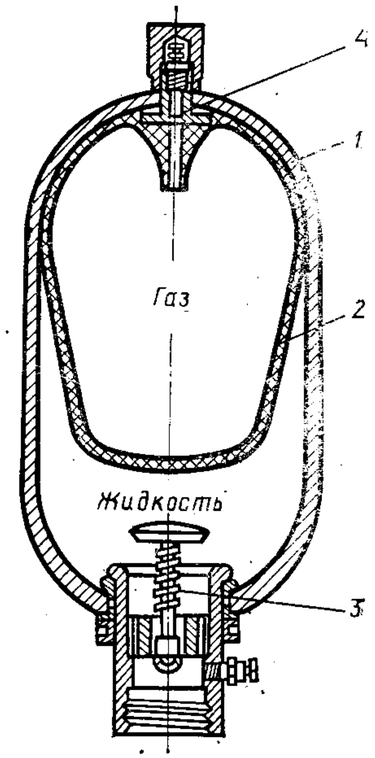


Рис. 3.25. Эксцентриковый плунжерный насос Н 403:
1 — корпус; *2* — вал с тремя эксцентриками; *3* — игольчатая обойма; *4* — всасывающий клапан; *5* — плунжер; *6* — пружина; *7* — нагнетательный клапан.

Рис. 3.26. Аккумулятор воздушно-беспоршневого типа:
1 — корпус; *2* — мешок из резины; *3* — клапан для жидкости; *4* — клапан для газа.



аккумуляторы отличаются большими габаритами, сложностью конструкции и колебаниями давления из-за изменения объема воздуха (газа) при изменении температуры и утечек его через уплотнения.

Современные аккумуляторы в большинстве случаев являются *воздушно-беспоршневыми*. Такой аккумулятор состоит из стального баллона, заполняемого жидкостью, и вспомогательных баллонов для подачи газа в основной баллон. Аккумулятор снабжается манометрами, предохранительными клапанами, автоматическими устройствами для поддержания уровня жидкости и давления в заданных пределах. Конструкция малогабаритного аккумулятора представлена на рис. 3.26. Он состоит из корпуса *1*, клапанов для жидкости *3* и газа *4*. Для устранения опасности образования взрывоопасной смеси при непосредственном контакте минерального масла и воздуха имеется разделительное устройство — эластичный мешок из резины *2*. При использовании вместо воздуха азота разделительное устройство не применяется.

Расчет объема аккумулятора $v_а$, необходимого для поддержания в системе необходимого диапазона давлений (от $p_{мин}$ до $p_{макс}$) может быть произведен по формуле

$$v_а = \frac{v_п}{1 - (p_{мин}/p_{макс})^{1/n}} + v_1 \qquad (3.33)$$

где $v_п$ — переменный рабочий объем жидкости в аккумуляторе; n — показатель политропичности процесса ($n = 1{,}3 \div 1{,}35$); v_1 — минимальный аварийный объем жидкости ($v_1 \approx 0{,}3 v_п$).

Толщина стенки баллона $\delta_б$ определяется по формуле

$$\delta_б = \frac{pD_а}{2\varphi[\sigma] - p} + c_а + c_1 \qquad (3.34)$$

где p — расчетное давление; $D_б$ — внутренний диаметр баллона; φ — коэффициент прочности сварного соединения; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение; $c_а$ и c_1 — прибавки к толщине стенки на коррозию и технологические припуски, выбираемые из условия $(\delta_б - c_а - c_1)/D_б \leqslant 0{,}1$.

3.4.4. Распределительная аппаратура

Необходимым элементом гидравлической схемы пресса является распределительная аппаратура, соединяющая рабочие и возвратные полости гидроцилиндров с источником рабочей жид-

кости (насосами, аккумулятором) или со сливом в соответствии с циклограммой работы пресса. По конструктивным признакам распределители подразделяются на золотниковые, клапанные, крановые, и шпиндельные. Распределители могут быть прямого действия, работающие без усиления внешнего сигнала, воздействующего на рабочий орган распределителя, и со специальным усилителем этого сигнала, называемым сервоустройством.

По виду привода распределители могут быть классифицированы на распределители с ручным, пневматическим, гидравлическим, электромагнитным и электромеханическим приводом.

Золотниковые распределители применяются главным образом в прессах с безаккумуляторным приводом. В зависимости от назначения золотниковые распределители выполняются на

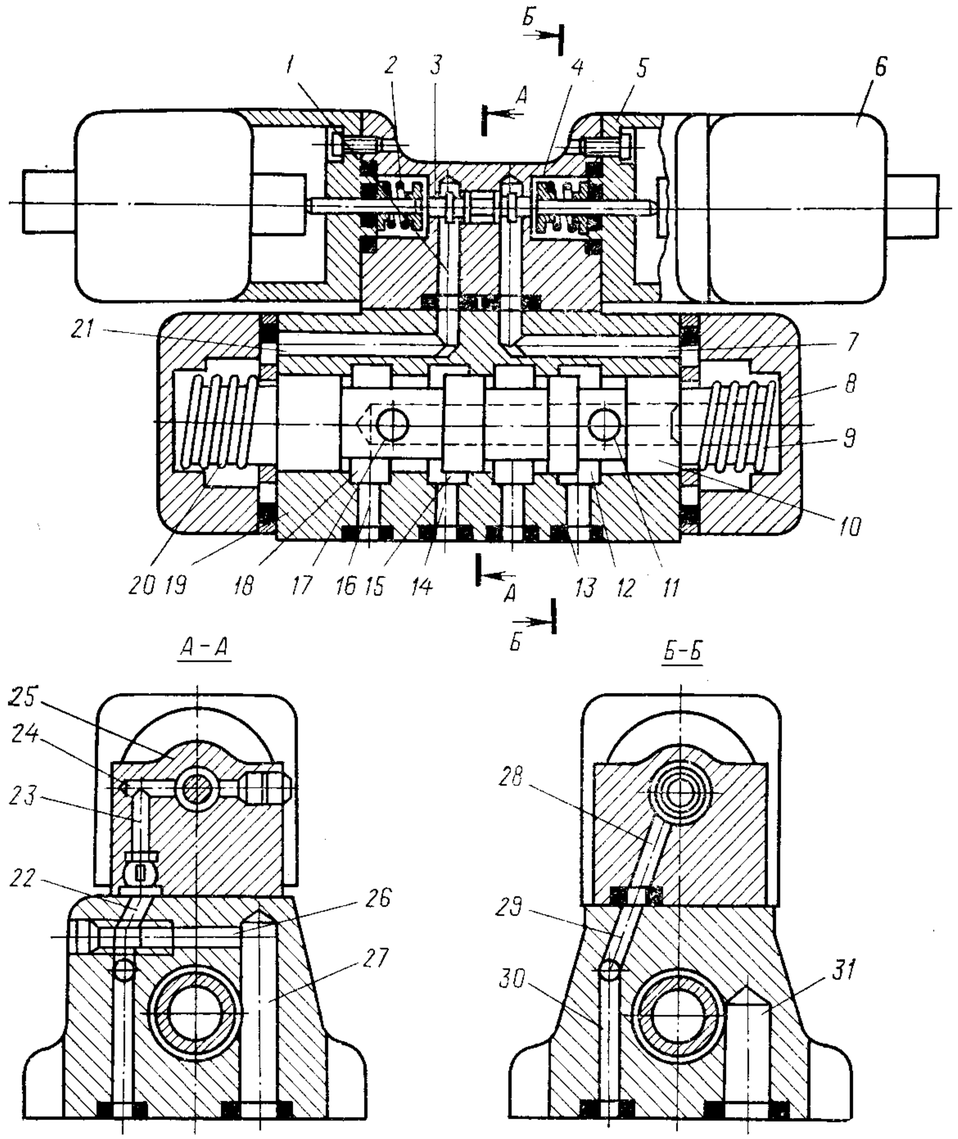


Рис. 3.27. Реверсивный золотник типа 4Г 73-4:

1, 4, 7, 11, 14, 16, 17, 21—24, 26—31 — каналы; *2, 9* — пружины; *3* — золотник-пилот; *5* — фланец; *6* — электромагнит; *8* — крышка; *10* — главный золотник; *12, 13, 15, 18* — проточки; *19* — корпус; *20* — подзолотниковая полость; *25* — корпус золотника управления.

две или три позиции и используются для различного числа ходов масла. Позиции золотника определяются положениями, которые он может занимать при переключениях. Под ходом масла понимают возможное направление его движения через распределитель. В зависимости от числа ходов различают трех-, четырех- и пятиходовые золотниковые распределители.

Золотниковые распределители с ручным управлением изготавливаются с малыми проходными сечениями и используются для прессов, не требующих автоматического управления. Золотниковые распределители с дистанционным управлением выполняются как с непосредственным перемещением золотника от электромагнитов, так и со вспомогательной системой масляного или пневматического управления.

Трехпозиционный четырехходовой реверсивный золотник с электрогидравлическим управлением типа ЧГ 73-4 (рис. 3.27) состоит из корпуса *19* и главного золотника *10*, крышек *8*, пружин возврата *9*, корпуса золотника управления *25* с золотником-пилотом *3*, фланцев *5*, пружин *2* и электромагнитов *6*. При включении правого электромагнита *6* золотник-пилот *3* передвигается в крайнее левое положение и соединяет канал *24* с каналом *1* и канал *4* с каналом *28*. Масло от насоса через канал *27*, проточку *13*, каналы *26*, *22*, *23* проходит в канал *24*. По каналу *21* масло поступает в подзолотниковую полость *20* и перемещает главный золотник *10* в крайнее правое положение. Золотник *10* вытесняет масло из правой подзолотниковой полости по каналам *7*, *4*, *28*, *29*, *30* в бак. Перемещение главного золотника *10* в крайнее правое положение обеспечивает подвод масла в рабочую полость цилиндра за счет соединения канала *27* через проточки *13*, *12* с каналом *31*.

Включением левого электромагнита осуществляют обратное перемещение главного золотника и изменение направления потока масла в другую полость цилиндра через проточки *13*, *15* и канал *14*. Из рабочей полости цилиндра масло вытесняется через каналы *11*, *17*, проточку *18* и внутренний канал главного золотника, далее через канал *16* в бак. При включении обоих магнитов и золотник управления, и главный золотник будут находиться в среднем положении, перекрывая проходы в цилиндр и направляя поток рабочей жидкости на слив.

Клапанные распределители представляют собой устройства, обеспечивающие перекрывание потока жидкости благодаря беззазорному прилеганию двух поверхностей. Подвижная часть клапанного распределителя называется клапаном, а неподвижная — седлом. В отличие от золотниковых распределителей, которые могут выполняться при наличии одного золотника многопозиционными и многоходовыми, одноклапанный распределитель может быть только двухходовым (подвод и отвод) и двухпозиционным (открыто и закрыто). Из-за этой особенности любой клапанный распределитель с числом ходов и позиций более двух следует выполнять многоклапанным.

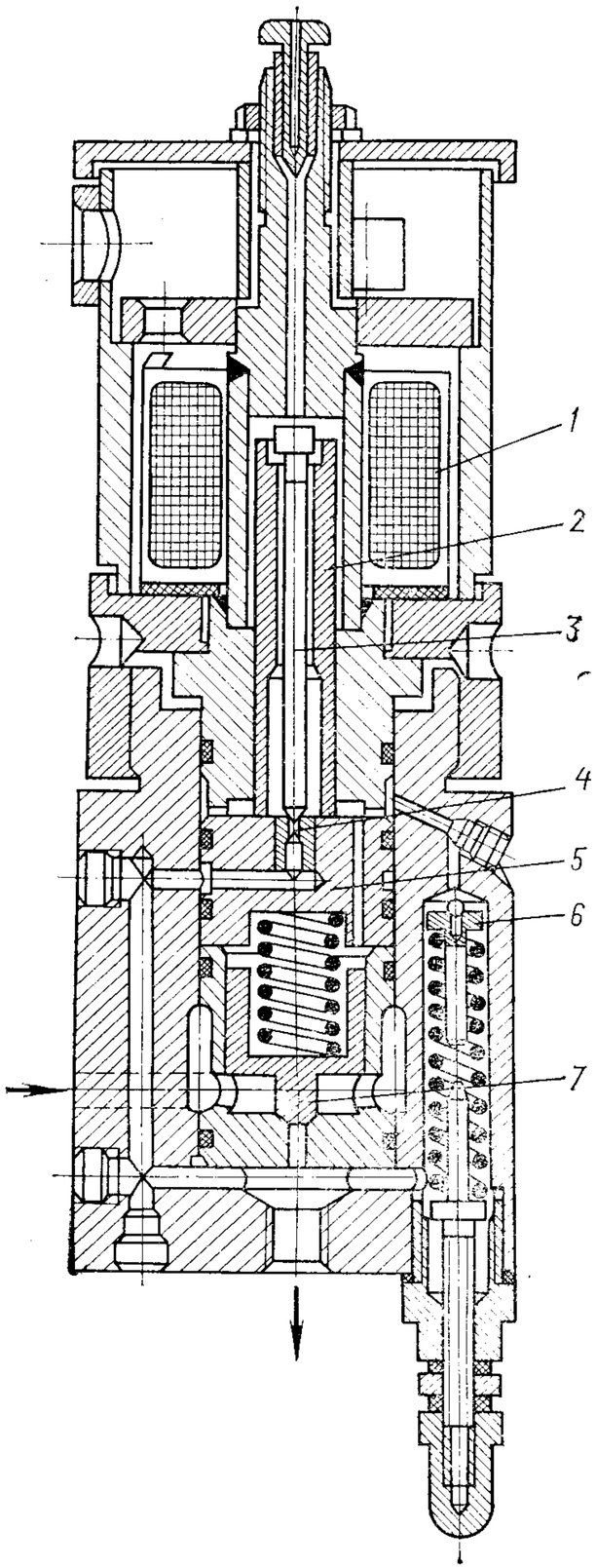


Рис. 3.28. Клапан с электромагнитным управлением:
1 — соленоид; *2* — сердечник; *3* — игла; *4* — отверстие основного клапана; *5* — основной клапан; *6* — шариковый клапан; *7* — наконечник.

Клапанные распределители применяют в системах индивидуального и группового гидропривода, работающего на минеральном масле, воде или водной эмульсии. Управление клапанами может осуществляться вручную, но чаще всего оно производится с помощью электромагнитов или соленоидными катушками, сердечник которых располагается в рабочей полости клапана.

Управление клапаном (рис. 3.28) осуществляется соленоидом *1*, размещенным в верхней части устройства. Игла *3*, закрывающая отверстие *4* основного клапана *5*, находится в сердечнике *2* из низкоуглеродистой стали, обладающей высокими магнитными свойствами. Иглу изготавливают из немагнитного материала. При включении соленоида сердечник втягивается, поднимая за заплечик иглу. При этом отверстие *4* в надклапанной области соединяется со сливным трубопроводом. В результате перепада давления в подклапанной и надклапанной полостях, который обеспечивается дроссельным отверстием в клапане *5*, клапан вместе с наконечником *7* поднимается, и напорная магистраль соединяется со сливным трубопроводом. Этот клапан может быть использован в качестве предохранительного, для чего на магистрали, соединяющей надклапанную полость со сливным трубопроводом, устанавливают шариковый клапан *6* с пружиной. При превышении давления, заданного настройкой пружины, шариковый клапан отжимается, и надклапанная область соединяется со сливным трубопроводом. При этом всплывает основной клапан и происходит разгрузка напорной магистрали.

Шпиндельные и крановые распределители выпускаются в основном с ручным управлением и применяются для вспомогательных целей в современных конструкциях гидропрессов.

3.4.5. Гидросхемы управления прессом

При построении гидравлических систем прессового оборудования различают структурную, принципиальную и монтажную схемы управления прессом.

Структурная схема дает общее представление об основных элементах прессовой установки и их взаимосвязи. Она выполняется с применением условных обозначений гидравлической аппаратуры в виде прямоугольников с указанием наименования устройства и его модели, типа и технической характеристики.

Принципиальная схема позволяет получить подробные сведения обо всех элементах гидропривода, их взаимосвязи, последовательности соединения друг с другом. Эта схема составляет с использованием условных обозначений элементов гидравлических сетей по ГОСТ 2.780—68, ГОСТ 2.781—68 и ГОСТ 2.782—68, трубопроводы изображаются линиями с цифровым обозначением.

Монтажная схема отличается от принципиальной тем, что на ней изображают действительное положение всей аппаратуры, а также конструкции соединений трубопроводов. Аппаратуру на монтажных схемах изображают в соответствии с ее габаритными размерами, с учетом удобства монтажа и свободного доступа ко всем соединениям.

Принципиальная схема управления гидравлическим прессом с индивидуальным приводом с помощью золотниковых распределителей представлена на рис. 3.29. Питание пресса осуществляется сдвоенным насосом *17*, состоящим из лопастного насоса производительностью 5 л/мин и давлением 2 МПа и плунжерного насоса с рабочим давлением 32 МПа при производительности 14 л/мин. Для получения высокой скорости рабочего хода используется аккумулятор беспоршневого типа *19*, заряженный азотом и работающий под давлением 16 МПа. Управление работой пресса проводится с помощью золотниковых распределителей *12*, *23*, *26*, управляемых пилотами, наполнительного клапана *2* и обратного клапана *9*. Последние управляются пилотом *11*. В гидравлическую схему пресса входят также предохранительные клапаны *22*, *25*, реле давления *6*, дроссели *8*, *20*, фильтры *18*, *27*, маслоохладитель *3*, клапан *7*, *10*, *14*, *16*, *27*, манометры *4*, *13*, *15*, *21*, вентили 1,5.

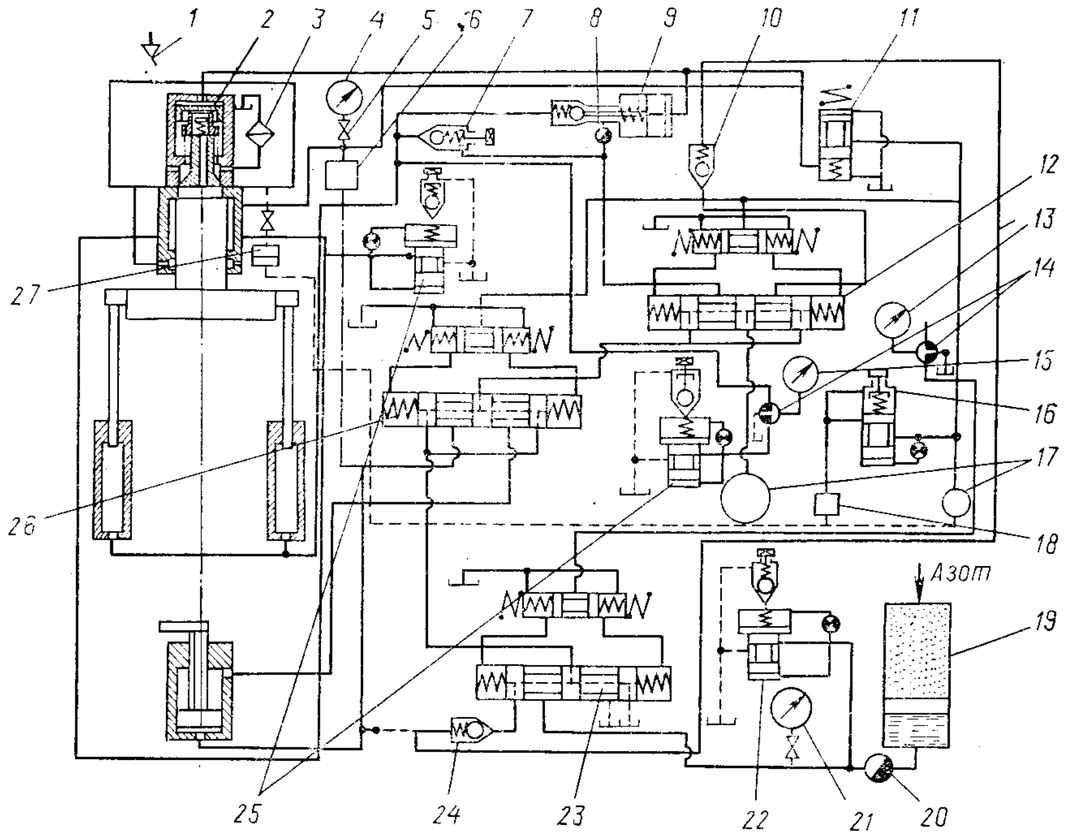


Рис. 3.29. Гидравлическая схема управления прессом типа ДБ 2430 А:
1, 5 — вентили; *2* — наполнительный клапан; *3* — маслоохладитель; *4, 13, 15, 21* — манометры; *6* — реле давления; *7, 10, 14, 16, 24, 27* — клапаны; *8, 20* — дроссели; *9* — обратный клапан; *11* — золотник-пилот; *12, 23, 26* — золотники; *17* — сдвоенный насос; *18, 27* — фильтры; *19* — аккумулятор; *22, 25* — предохранительные клапаны.

Опускание подвижной поперечины в данной конструкции происходит под действием ее собственного веса, при этом жидкость самотеком поступает через наполнительный клапан *2*. При этом вытесняется на слив масло из возвратных цилиндров через клапан *9* и золотники *12*, *23*, *26*. После смыкания формы клапан *2* отключается, и в рабочий цилиндр поступает масло сначала из аккумулятора *19*, а после достижения в системе давления 16 МПа — от насоса высокого давления. Для подъема плиты жидкость подается через золотник *12* и клапан *9* в возвратные цилиндры.

3.4.6. Устройства, обеспечивающие безопасность работы на гидравлических прессах

Все виды современного прессового оборудования оснащаются рядом предохранительных и защитных устройств, сблокированных в большинстве случаев с механизмом выключения пресса, т. е. при неисправном или снятом предохранительном устройстве должна быть исключена возможность включения пресса на рабочий ход.

К этим устройствам относятся: а) устройства, предохраняющие рабочего от ожогов нагретыми поверхностями прессового оборудования и от воздействия летучих веществ (теплоизоляция, отсос летучих); б) устройства, предохраняющие гидравлический пресс от перегрузок (предохранительные клапаны в гидросистеме); в) устройства, предотвращающие травмирование обслуживающего персонала в рабочей зоне пресса (ограждения, устройства для включения в работу двумя руками и т. д.).

3.5. ПРЕССЫ-АВТОМАТЫ

Современные гидравлические прессы — сложные механизированные установки, имеющие схемы управления с большим количеством обеспечивающих работу прессовой установки связей для автоматизации всех процессов прессования, загрузки и выгрузки. Автоматизация позволяет исключить случайности ручного управления и жестко регламентировать цикл прессования. В связи с различными требованиями, предъявляемыми к тем или иным прессам, и разным их назначением, а также в разные периоды работы применяются и различные режимы управления: наладочный, ручной, полуавтоматический и автоматический.

Прессы-автоматы создают на базе обычных универсальных прессов и прессов-полуавтоматов, на которых устанавливают дополнительные устройства: транспортирующие, дозирующие, разгрузочные, контролирующие, сигнальные. Универсальными прессами называют такие, которые приспособлены для компрессионного и трансферного прессования. При компрессионном прессовании нижний трансферный цилиндр используют для выталкивания. В прессах-полуавтоматах предусматривается последовательное автоматизированное выполнение операций цикла с введением ручного управления для связи отдельных групп операций цикла.

Для прессования порошковых материалов используются однооперационные прессы-автоматы с загрузочными и съемными устройствами, имеющими в основном пневматический привод. Двухоперационные прессы-автоматы выполняют таблетирование материалов и прессование изделий. Трехоперационные прессы-автоматы могут выполнять таблетирование, предварительный подогрев материала и прессование. Прессы с программным управлением оборудованы устройствами, программирующими несколько величин: время и давление прессования, выдержку на прессование и другие параметры цикла прессования.

Двух- и трехпозиционные прессы-автоматы могут быть оснащены пластикационными червячными приставками (см. разд. 2.8).

3.5.1. Механизмы автоматической загрузки материалов и съема изделий

Важными составными частями общего времени цикла прессования [формула (3.1)] являются продолжительность вспомогательных операций $t_{т1}$ и $t_{т2}$, связанных с загрузкой сырья и выгрузкой готовых изделий. Представив формулу (3.1) в виде

$$t_ц = t_п + t_в \qquad (3.35)$$

где

$$t_п = t_{пп} + t_э + t_в; \qquad t_в = t_{т1} + t_{т2}$$

получим выражение для параметра K_m, характеризующего степень механизации вспомогательных операций:

$$K_m = \frac{t_п}{t_п + t_в} \qquad (3.36)$$

Чем меньше значение $t_в$ в сравнении с оптимальным для данного процесса значением $t_п$, тем больше K_m и тем более совершенна механизация.

Анализ величины K_m показывает, что при значительном $t_п$ повышение производительности труда за счет сокращения времени загрузочно-разгрузочных операций малоэффективно. Появление быстроотверждающихся пресс-материалов и внедрение интенсифицированных режимов прессования снизили $t_п$ и соответственно K_m при неизменном вспомогательном времени. Таким образом, возникли предпосылки для изменения $t_в$ путем совершенствования механизации.

Существующие в промышленности системы механизации могут быть классифицированы по способу проведения операций загрузки и выгрузки: поэтапная загрузка сырья и выгрузка изделий и одновременное осуществление этих операций. Применяемые в прессах системы механизации подразделяются на двухсторонние, когда загрузка и выгрузка происходит с противоположных сторон пресса, и односторонние, когда эти операции производятся с одной стороны.

Механизмы загрузки и выгрузки работают с применением или без применения металлических транспортирующих поддонов.

Загрузка порошкообразных и гранулированных пресс-материалов в пресс-форму производится автоматическими механизмами шиберного и шлангового типов. В *загрузочных устройствах шиберного типа* (рис. 3.30) имеются загрузочные гнезда *4* прямоугольного или круглого сечения, объем которых можно регулировать. При работе устройства пресс-материал из бункера *1* через питатель *2* попадает в гнезда *4* шиберной плиты *3* (поз. «*а*»). При этом дно загрузочного гнезда закрыто шиберной заслонкой *5*. После перемещения плиты *3* в поз. «*б*» над матрицей пресс-формы *6* гнезда *4* открываются снизу, и материал высыпается в полость матрицы.

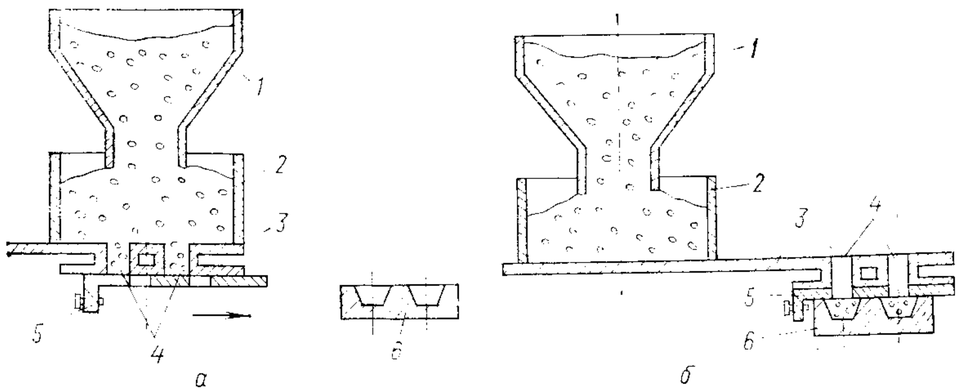


Рис. 3.30. Автоматическое загрузочное устройство шиберного типа:
а — загрузка гнезд шиберной плиты; *б* — загрузка матрицы;
1 — бункер; *2* — питатель; *3* — шиберная плита; *4* — гнезда; *5* — шиберная заслонка; *6* — матрица пресс-формы.

Загрузочные устройства шлангового типа более сложны по конструкции и отличаются от загрузочных устройств шиберного типа тем, что пресс-материал поступает в матрицу через гибкие шланги, подводимые к оформляющей полости во время загрузки.

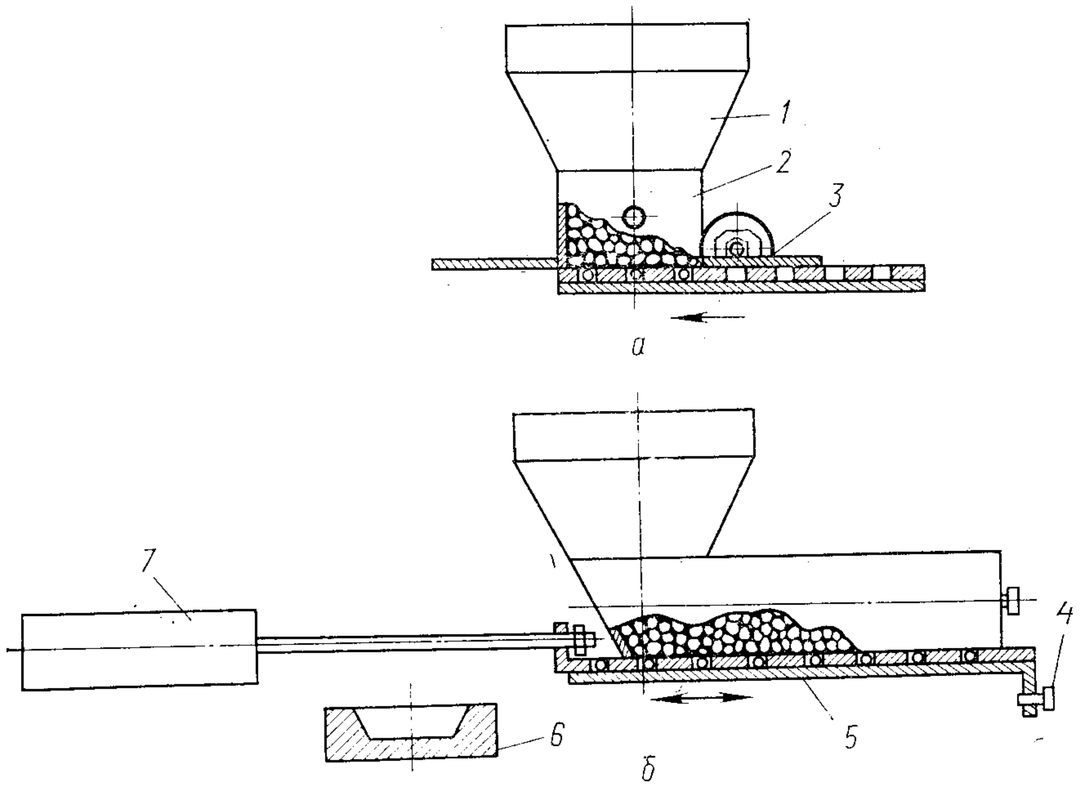


Рис. 3.31. Автоматическое устройство для загрузки таблеток в многогнездную пресс-форму:
а — загрузка таблеток в отверстие шиберной плиты; *б* — перенос таблеток шиберной плитой в полость матрицы;
1 — бункер; *2* — загрузочный лоток; *3* — шиберная плита; *4* — винт; *5* — шиберная заслонка; *6* — матрица пресс-формы; *7* — гидроцилиндр.

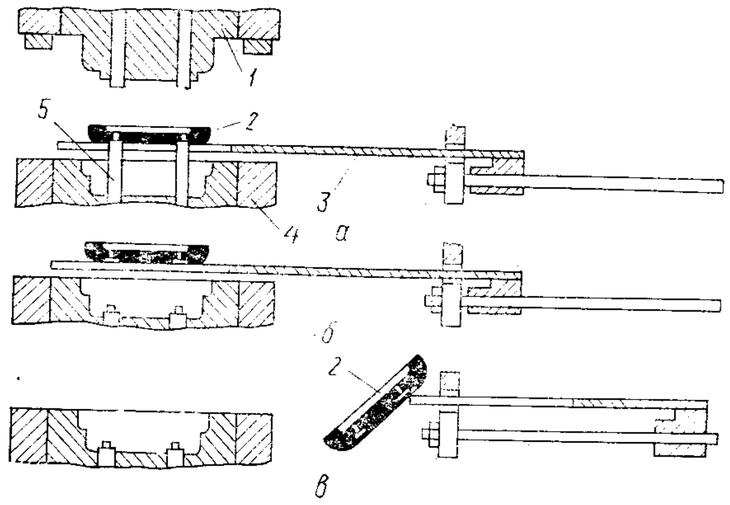


Рис. 3.32. Автоматическое устройство для удаления изделий из матрицы (*а*, *б*, *в* — см. текст):
1 — пуансон; *2* — изделие; *3* — вилка; *4* — матрица; *5* — шпилька выталкивателя.

Объемное дозирование сыпучего нетаблетированного материала не обеспечивает высокой точности проведения загрузки в сравнении с выполнением этой операции при использовании таблетированного сырья. Для загрузки цилиндрических таблеток находят применение *устройства дискового вибрационного и шиберного типов*. Одно из таких устройств для загрузки таблеток шарообразной формы показано на рис. 3.31. В положении «*а*» загрузочный лоток *2* загружается таблетками из бункера *1*. При этом под влиянием вибрационных колебаний, сообщаемых шиберной плите *3* в направлении, поперечном ее перемещению, таблетки выходят через загрузочную щель из лотка *2* и располагаются в гнездах плиты *3*. При перемещении загрузочного устройства в положение «загрузка» при помощи гидроцилиндра *7* и совпадении гнезд плиты *3* с полостями матрицы *6*, обеспечиваемом винтом *4*, шиберная заслонка *5* открывается, и происходит перегрузка таблеток в матрицу.

Устройства для удаления готовых изделий служат для выгрузки отпрессованных изделий после их выталкивания из полости формы. При схеме выталкивания изделий снизу (рис. 3.32) в зазор между матрицей *4* и изделием *2* вводится вилка *3* с прорезями для шпилек выталкивателя *5* (рис. 3.32, *а*). После опускания выталкивателя (рис. 3.32, *б*) изделие остается на вилке и удаляется из полости смыкания полуформ (рис. 3.32, *в*). При схеме выталкивания изделий сверху последние сбрасываются на приемный лоток и перемещаются в приемную тару.

После окончания процесса прессования и удаления готового изделия полость формы очищается от облоя струями сжатого воздуха, подводимого из автоматически перемещаемых гибких шлангов. Очистка полости формы может быть совмещена во времени с удалением изделия, которое может также производиться с помощью пневматического устройства.

3.5.2. Роторные прессы

Существенным недостатком процесса прессования на прессах-автоматах является необходимость затраты значительной части времени цикла прессования на выполнение вспомогательных операций. Эти непроизводительные затраты времени включают выстои в сомкнутом и разомкнутом состояниях, загрузку сырья и удаление изделий и т. д. Задача высвобождения пресса от ряда операций и передача их другим устройствам может быть решена при использовании роторных прессов.

Роторные прессы бывают револьверного и ротационного типов. В первых ротор поворачивается периодически на определенный угол, во вторых — вращается непрерывно.

Роторно-револьверный десятипозиционный пресс, схема которого представлена на рис. 3.33, состоит из десяти комплектов пресс-инструмента (пуансон *4* и матрица *3*) и десяти подвижных гидроцилиндров, вращаемых ротором с помощью электропривода. При работе агрегата таблетка по лотку *1* через воронку *2* поступает в матрицу *3* (поз. *I*). После смыкания пресс-инструмента гидроцилиндром в поз. II следует процесс выдержки изделия на отверждение при последовательном перемещении пресс-инструмента в поз. *III—VIII* в сомкнутом состоянии. В поз. *IX* пресс-форма размыкается, в поз. *X* изделие снимается. В связи с тем, что отпрессованное изделие имеет резьбу, конструкция пресса предусматривает свинчивание изделия с пуансона патроном *5* съемного устройства *6*. В дальнейшем цикл прессования повторяется.

На роторном прессе обычно используют одногнездные пресс-формы, что позволяет снизить усилие прессования, облегчает нагрев и контроль температуры, упрощает загрузку сырья и очистку оформляющих полостей пресс-форм.

3.5.3. Роторные линии

Наиболее полно требованию автоматизации процесса прессования удовлетворяют роторные линии, в которых сов-

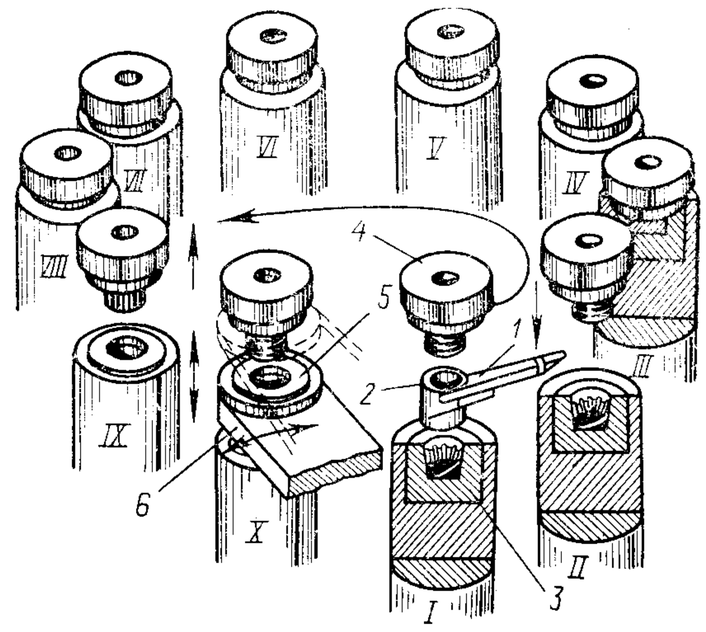


Рис. 3.33. Схема работы роторно-револьверного пресса (поз. *I—X* — см. текст):
1 — лоток; *2* — воронка; *3* — матрица; *4* — пуансон; *5* — патрон съемного устройства; *6* — съемное устройство.

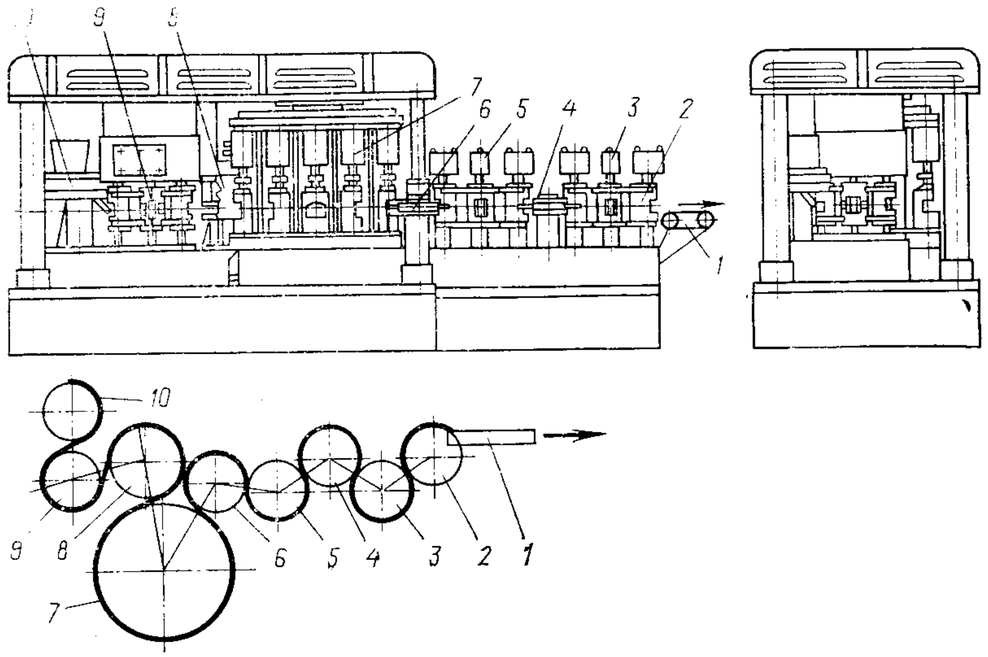


Рис. 3.34. Схема роторной линии:

1 — лоток-конвейер; *2*, *4*, *6*, *9* — транспортные роторы; *3*, *5* — роторы механической обработки изделий; *7* — ротор прессования; *8* — ротор предварительного подогрева ТВЧ; *10* — ротор дозирования и таблетирования материала.

мещены во времени все транспортные операции с производственными. Роторные линии предназначены для прессования изделий простой формы без арматуры.

Роторная линия состоит из нескольких синхронно вращающихся роторов, каждый из которых предназначен для осуществления какой-либо технологической или транспортной операции. Каждая из позиций ротора оснащена комплектом инструмента, который вращается с ротором и обрабатываемым материалом. Рабочий инструмент выполняет необходимую рабочую операцию для осуществления отдельной фазы технологического цикла получения изделия.

Роторная линия, представленная на рис. 3.34, состоит из пяти технологических и четырех транспортных роторов. Жесткая кинематическая связь всех роторов с электродвигателем создает необходимые предпосылки для их синхронного вращения. Ротор дозирования и таблетирования материала *10* представляет собой по существу ротационную таблеточную машину. Таблетка материала с ротора *10* по транспортному ротору *9* поступает на ротор предварительного подогрева токами высокой частоты (ТВЧ) *8* и далее на ротор прессования *7*. Ротор прессования состоит из ряда комплектов пуансон — матрица с устройствами для их смыкания (вращающимися вместе с ротором гидроцилиндрами). Транспортный ротор *6* переносит пресс-изделие на ротор *5* для механической обработки. Эти же операции осуществляются дополнительно и на роторе *3* после

поступления туда изделия по транспортному ротору *4*. Далее ротор *2* переносит готовое изделие в лоток-конвейер *1*.

Производительность роторной линии $Q_р$ (изделий/ч) определяется по формуле

$$Q_р = 60 n_р \frac{\alpha}{360 t_ц} \qquad (3.37)$$

где $n_р$ — число комплектов однотипных пресс-форм; α — угол поворота прессующего ротора; $t_ц$ — время цикла прессования изделия.

3.6. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССЫ

Принцип действия большинства гидравлических прессов и методика проведения технологических процессов на них аналогичны, но в конструкции могут быть существенные отличия, связанные с проведением специфических операций или с получением особого вида изделий. К таким прессам относятся специализированные прессы. Конструкции и технологические схемы работы некоторых из них будут рассмотрены в этом разделе, а также в разд. 10.4.4.

3.6.1. Прессы для литьевого прессования реактопластов и резиновых смесей

Методом литьевого прессования (см. разд. 3.1) перерабатываются реактопласты и резиновые смеси на прессах, имеющих дополнительный нижний гидравлический цилиндр для нагнетания расплава материала. Движение трансферного плунжера *7* (рис. 3.35) происходит под давлением жидкости, поступающей через отверстия *1* и *8* в полость трансферного цилиндра *9*. Перемещение нижней поперечины *6* для создания усилия смыкания формы осуществляется при нагнетании рабочей жидкости через отверстия *2* и *3* в полость силового цилиндра *10*. Тяги *4* и *5* служат для верхнего и нижнего выталкивания изделий.

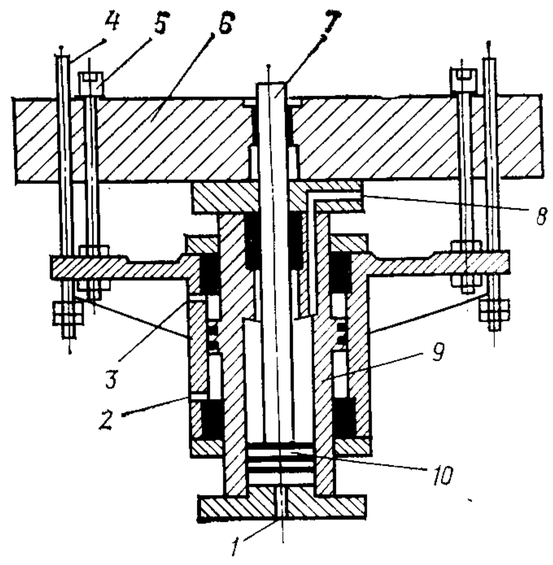


Рис. 3.35. Узел литьевого прессования пресса-автомата:

1, *8* — отверстия для нагнетания жидкости в трансферный цилиндр; *2*, *3* — отверстия для нагнетания жидкости в силовой цилиндр; *4*, *5* — тяги выталкивателей; *6* — нижняя поперечина; *7* — плунжер; *9* — трансферный цилиндр; *10* — силовой цилиндр.

3.6.2. Этажные прессы

Этажные прессы применяются для получения листовых изделий из слоистых и композиционных материалов, а также для вулканизации резиновых изделий. Листовые изделия и заготовки прессуют между плитами, нагретыми до температуры, заданной технологическим режимом, и под давлением, обеспечивающим необходимое уплотнение материала. Для повышения производительности пресса целесообразно увеличение площади прессуемого материала. Поэтому прессы для листовых материалов выполняют с большим числом плит, расположенных одна над другой. Каждый промежуток между плитами образует один рабочий этаж.

Пресс с несколькими рабочими этажами, образованными путем введения в рабочее пространство пресса промежуточных плит, показан на рис. 3.36. На прессе установлены два гидроцилиндра *1* с плунжерами *3* и подвижными поперечинами *2*. Над каждой поперечиной *2* укреплены тринадцать этажных плит *4*, обогреваемых перегретой водой. Пресс обслуживается камерами-этажерками для загрузки прессуемых пакетов и выгрузки листовых изделий.

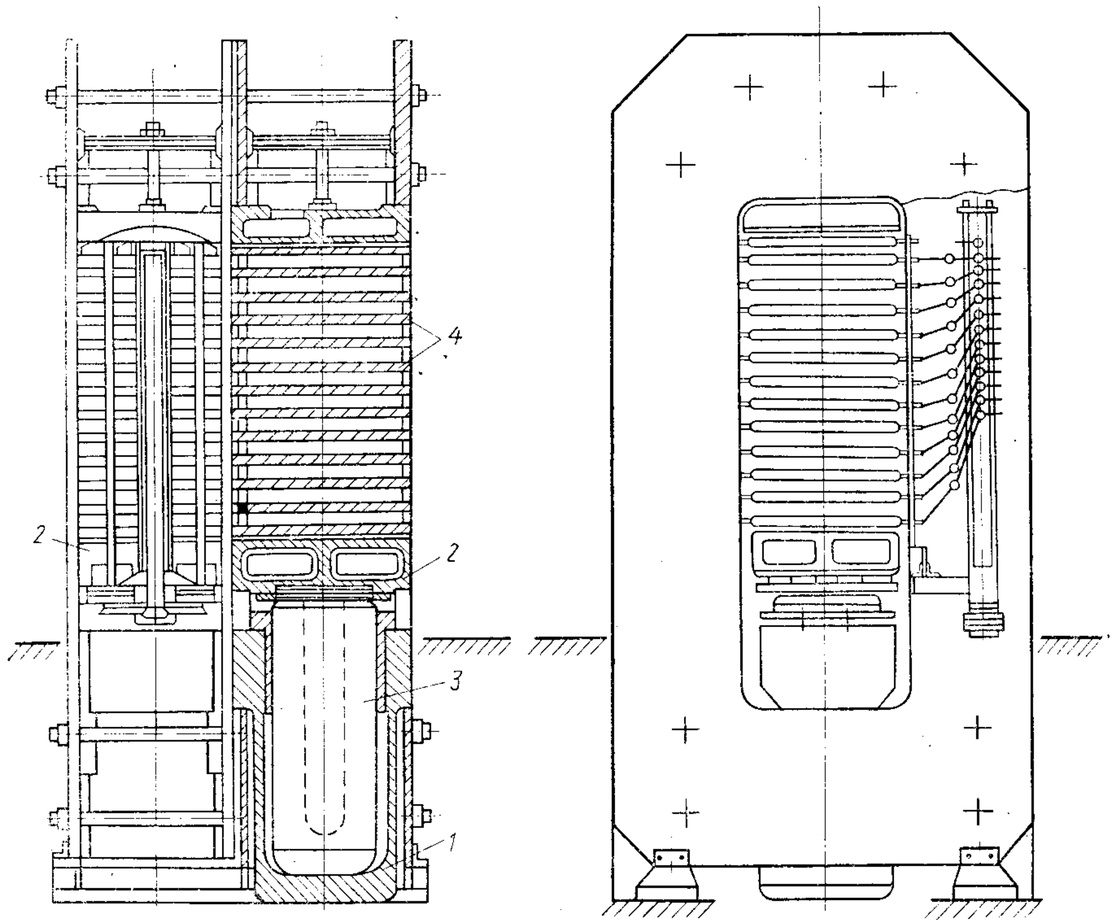


Рис. 3.36. Этажный пресс-автомат:
1 — гидроцилиндр; *2* — подвижная поперечина; *3* — плунжер; *4* — этажные плиты.

ГЛАВА 4

ЧЕРВЯЧНЫЕ МАШИНЫ

4.1. СУЩНОСТЬ ЭКСТРУЗИОННОГО МЕТОДА

Червячные машины — один из наиболее распространенных видов оборудования, используемого в промышленности производства и переработки полимерных материалов. В различных отраслях промышленности эти машины иногда называют *экструдерами, шприц-машинами, червячными пластикаторами* и т. д., причем, как правило, каждое из этих названий связано с каким-либо конкретным направлением их применения. Например, при производстве и переработке резиновых смесей их называют шприц-машинами. Область применения червячных машин достаточно широка и определяется теми процессами, которые могут быть реализованы в их рабочих органах.

Главные рабочие органы червячной машины — полый цилиндр и вращающийся в нем червяк. Основной процесс, происходящий во всех червячных машинах, — это транспортирование материала вдоль винтового канала, образованного внутренней поверхностью цилиндра и нарезкой червяка. Транспортирование, как правило, сопровождается интенсивным деформированием материала и развитием давления в винтовом канале. Одновременно с транспортированием в канале могут протекать самые различные процессы: смешение компонентов материала, обусловленное его деформированием; нагрев материала за счет превращающейся в тепло работы деформирования или за счет тепла, поступающего от цилиндра, снабженного нагревателями; переход материала из твердого в вязкотекучее состояние за счет нагрева; инициированные нагревом различные химические реакции в материале; уплотнение и монолитизация рыхлых сыпучих материалов вследствие развивающегося давления; удаление из материала какого-либо из компонентов (например, отжатие под действием давления влаги из каучука или регенерата, удаление растворенных в расплаве полимера газообразных веществ).

Червячная машина работает, как правило, совместно со сменным инструментом (экструзионный головкой), устанавливаемым на выходе из отверстия цилиндра. Материал продавливается через каналы экструзионной головки под действием давления, развивающегося в канале червяка. Основные функции головок состоят в следующем: придание непрерывно выдавливаемому из головки материалу конфигурации будущего изделия или полуфабриката; наложение слоя материала на какой-либо сердечник, протягиваемый через головку; фильтрация материала (очистка

его от инородных твердых включений). Многие головки выполняют одновременно две или три функции.

Иногда червячная машина не имеет головки. В этом случае она нагнетает материал в промежуточную емкость, откуда он периодически отбирается для формования в изделия, например, методом прессования.

Благодаря отмеченному многообразию процессов, которые могут быть осуществлены в экструзионных машинах, они используются на всех основных стадиях производства полимерных материалов и изделий из них: при получении полимеров, при приготовлении композиционных материалов на основе полимеров и олигомеров, при формовании полуфабрикатов и изделий из этих материалов.

При получении полимеров червячные машины (экструдеры) устанавливают на выходе из трубчатых реакторов или полимеризационных колонн. В этом случае экструдер используется для удаления расплава из остаточного мономера и подачи его в гранулирующую головку.

При приготовлении композиционных материалов экструдер чаще всего используется как смеситель, осуществляющий введение в полимер красителей, стабилизаторов, пластификаторов, наполнителей и прочих добавок, а также грануляцию получаемого композиционного материала. Таково использование червячных машин при производстве реактопластов и резиновых смесей. В резиновой промышленности они используются также для пластикации каучука, фильтрации и грануляции резиновых смесей, девулканизации резины и обезвоживания регенерата.

При формовании полуфабрикатов и изделий червячные машины используются прежде всего для пластикации материала, т. е. для перевода его в вязкотекучее состояние путем нагрева.

При экструзионном методе формования изделий экструдеры выполняют функции пластикатора и насоса, непрерывно продавливающего полученный в винтовом канале расплав материала через головку. Экструзионным методом получают изделия и заготовки с различной конфигурацией поперечного сечения и любой длины, наносят изоляцию на провода и кабели, покрытия на строительные профили из дерева и металла, получают трубы, листы, пленки и волокна. В резиновой промышленности этот метод используется также для производства заготовок протекторов, камер и ободных лент пневматических шин, для обрезинивания проволоки и т. д.

При экструзионно-выдувном методе формования функции экструдера те же, что и при экструзионном; назначение его в этом случае — получить трубчатую заготовку расплава для последующего формования из нее изделия.

При формовании изделий методами прессования и литья под давлением червячные машины выполняют функции пластикатора и дозатора, подготавливающего для последующего формования дозу расплава с заданными температурой и массой.

Червячные машины чаще всего не эксплуатируются самостоятельно, а входят в состав специализированных агрегатов, состоящих из ряда машин, работающих согласованно. Например, агрегат для производства листов включает в себя помимо экструдера каландр, а также отрезное и транспортирующее устройство. В литьевом методе формования червячный пластикатор-дозатор не является самостоятельной машиной, а входит в состав литьевой машины в качестве одной из сборочных единиц.

4.2. ОБЩЕЕ УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЧЕРВЯЧНЫХ МАШИН

Конструкция любой червячной машины включает в себя следующие основные узлы: загрузочное устройство, рабочие органы (червяк и цилиндр), привод червяка во вращение, узел упорного подшипника, узел подачи термостатирующей жидкости в червяк.

Принципиальное устройство и взаимодействие этих узлов ясны из схемы червячной машины, предназначенной для переработки термопластов методом экструзии (рис. 4.1). Экструдируемый термопласт в виде гранул (реже порошка) из бункера *9* через окно *10* загрузочной секции цилиндра *8* попадает в винтовой канал вращающегося червяка *6*. При транспортировке червяком в этой секции материал уплотняется, а заключенный меж-

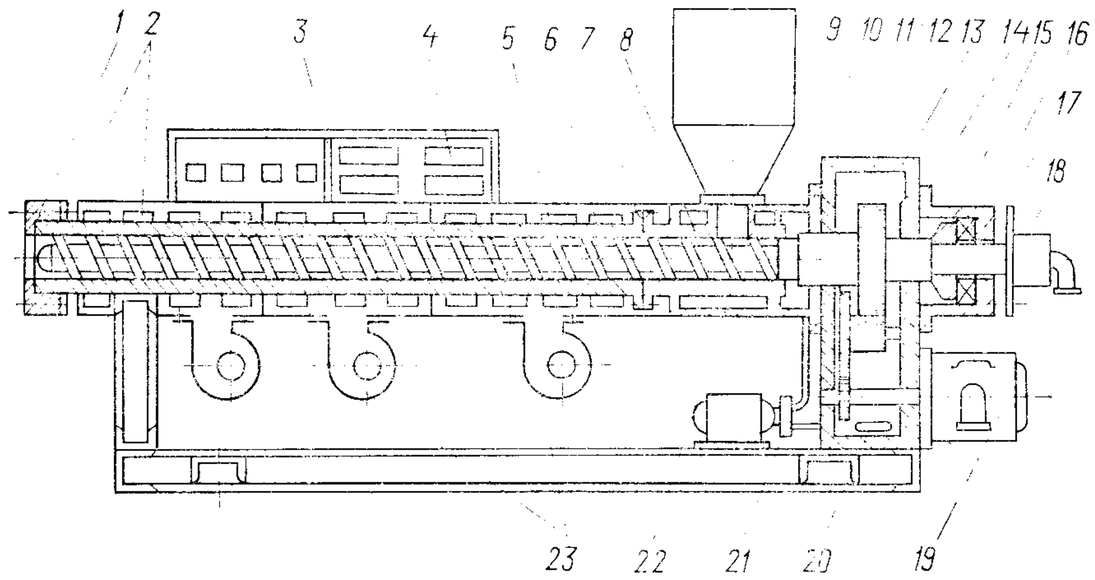


Рис. 4.1. Принципиальная схема одночервячного экструдера для переработки термопластов:

1 — фланец цилиндра; *2* — нагреватели; *3* — пульт электро- и тепловой автоматики; *4* — прибор теплового контроля; *5* — обогреваемая секция цилиндра; *6* — червяк; *7*, *11*, *14* — болтовые соединения; *8* — загрузочная секция цилиндра; *9* — бункер; *10* — окно загрузочной секции цилиндра; *12* — выходной вал редуктора; *13* — редуктор; *15* — упорная шайба; *16* — упорный подшипник; *17* — корпус подшипника; *18* — устройство для подачи охлаждающей жидкости в червяк; *19* — электродвигатель; *20* — змеевик для охлаждающей воды; *21* — масляный насос; *22* — канал для циркуляции охлаждающей воды; *23* — вентиляторы.

ду гранулами воздух частично уходит обратно через окно *10* в бункер.

Попадая в обогреваемую секцию цилиндра *5*, материал прогревается и переходит в вязкотекучее состояние. Прогрев и плавление его осуществляются как за счет тепла, подводимого от расположенных на цилиндре нагревателей *2*, так и за счет тепла, выделяющегося при интенсивном деформировании уже образовавшегося расплава. На этой стадии воздушное пространство между размягчающимися и продолжающими уплотняться гранулами исчезает полностью. Объем, занимаемый материалом, при этом уменьшается, поэтому во избежание образования пустот в потоке материала, движущегося по винтовому каналу, последний выполняют с глубиной, монотонно уменьшающейся по ходу продвижения материала.

Подготовленный таким образом расплав термопласта продавливается червяком через каналы формующего инструмента (экструзионной головки), укрепляемого на фланце *1* цилиндра.

Надежность подачи материала в канал червяка и равномерность захвата его и транспортирования винтовой нарезкой в загрузочной секции цилиндра — один из важных факторов обеспечения стабильности производительности экструдера. Стабильность производительности — непременное условие размерной стабильности экструдируемого изделия. Между тем, только гранулированные материалы равномерно и бесперебойно просыпаются из бункера *9* через окно *10* по мере отбора их червяком. В связи с этим при переработке порошкообразных и слабо сыпучих материалов червячные машины оснащаются специальными загрузочными устройствами, обеспечивающими принудительное питание (см. разд. 4.14), а рабочие поверхности цилиндра и червяка в области загрузочной секции *8* часто снабжаются элементами, способствующими захвату и транспортированию материала.

Загрузочная секция *8*, контактируя с обогреваемой секцией *5*, сама может нагреваться до температур, близких к температуре плавления. По этой причине возможно прилипание материала к стенкам загрузочного окна и прекращение подачи его из бункера. Во избежание нагрева секция *8* охлаждается водой, циркулирующей в канале *22*.

При обработке резиновых смесей возможны два варианта питания шприц-машины: непрерывная подача ленты холодной или подогретой резиновой смеси непосредственно в загрузочное окно первой секции цилиндра; периодическая загрузка рулона смеси в загрузочный люк, из которого она передавливается в загрузочное окно плунжером пневмоцилиндра.

Во всех конструкциях червячных машин обогрев цилиндра используется в период пуска, чтобы достичь рабочей температуры цилиндра. По достижении установившегося режима работы количество тепла, выделяющегося в результате рассеяния (диссипации) работы деформирования материала при транспортировании его в канале червяка, зачастую превышает то количество тепла, которое необходимо для нагрева материала до требуемой температуры. Излишек тепла в таких случаях отводится системами охлаждения цилиндра и червяка.

Червяк охлаждается водой или (реже) высококипящими жидкостями, подаваемыми из устройства *18* в просверленное в нем центральное отверстие. Цилиндр может иметь жидкостное или, как показано на схеме, воздушное (при помощи вентиляторов *23*) охлаждение. Как видно из рис. 4.1, обогреваемая секция имеет три (а часто четыре и более — в зависимости от типоразмера машины) зоны независимого теплового регулирования. Для каждой из зон сигнал от установленной в теле цилиндра термопары подается на прибор теплового контроля *4* (смонтирован на пульте электро- и тепловой автоматики *3*), где он сравнивается с заданной температурой. Если фактическая температура цилиндра превышает заданную, то подается команда на отключение нагревателей *2* и включение вентиляторов *23* системы воздушного охлаждения, и наоборот.

При продавливании расплава через каналы головки вследствие значительного гидравлического сопротивления каналов и высокой вязкости материала на входе в головку (т. е. перед червяком) развивается давление, достигающее иногда 40 МПа. Вследствие этого возникает значительное осевое усилие, действующее на червяк и стремящееся переместить его вправо (см. рис. 4.1). Это усилие с червяка передается на выходной вал *12* редуктора *13*; с него — на упорную шайбу *15* и далее — на упорный подшипник *16* и его корпус *17*. Корпус подшипника болтовыми соединениями *14* неподвижно укреплен на корпусе редуктора *13*, на который в конечном счете и передается усилие.

Развивающееся перед головкой давление расплава действует и на контактирующую с ним поверхность канала головки, создавая на ней усилие, равное по величине описанному выше, но противоположно направленное, т. е. действующее влево (см. рис. 4.1). Так как головка закреплена на фланце *1*, то это усилие передается на него и затем через резьбу — на секцию *5*; с нее через болтовое соединение *7* — на секцию *8* и через такое же соединение *11* — на корпус редуктора. Таким образом, существует замкнутая цепь деталей червячной машины, воспринимающих рабочее усилие. Все отмеченные детали при проектировании машины должны быть рассчитаны с учетом действия этого усилия.

Необходимо отметить, что, несмотря на большой к. п. д. упорного подшипника, из-за большой величины воспринимаемого усилия в нем теряется значительная часть мощности привода, превращающаяся в тепло. Во избежание перегрева подшипника в машинах средних и больших типоразмеров осуществляется циркуляционная жидкостная смазка подшипника. Масло, забираемое насосом *21* из поддона редуктора, подается на полив его шестерен и на смазку, а также — на охлаждение подшипника *16*.

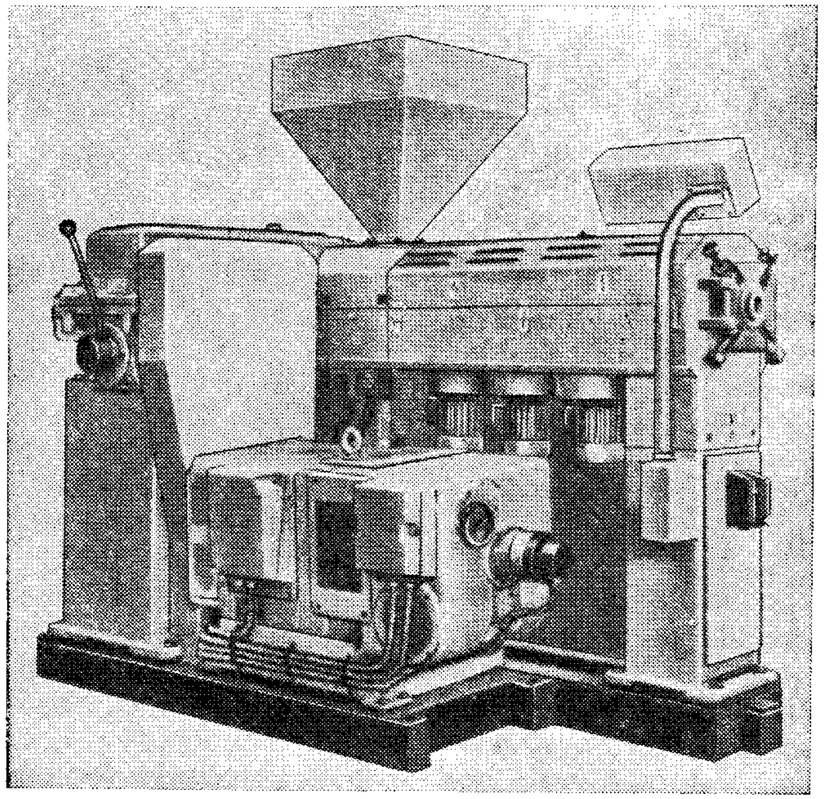


Рис. 4.2. Общий вид современной червячной машины.

Из корпуса подшипника *17* оно вновь стекает в поддон. Масло в поддоне охлаждается циркулирующей в змеевике *20* водой.

На рис. 4.2 показан общий вид экструдера для термопластов одной из современных конструкций.

4.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ МАШИН

Можно выделить две группы признаков, по которым классифицируются червячные машины. Различия в конструкциях по признакам первой группы обусловлены требованиями:

— обеспечения оптимальных условий протекания технологических процессов, которые реализуются в данной червячной машине;

— обеспечения согласованности работы червячной машины с другими машинами, в совокупности образующими конкретный агрегат или технологическую линию.

Признаки этой группы можно назвать конструктивно-технологическими.

Различия в конструкциях по признакам второй группы определяются:

— требованиями удобства обслуживания при эксплуатации и ремонте;

— условиями эксплуатации (отсутствие или наличие пыле- и газовыделений, категория взрыво- и пожароопасности цехового помещения и т. д.).

Признаки этой группы будем называть конструктивными.

4.3.1. Конструктивно-технологические признаки

Диаметр червяка. Этот признак основной, так как в первую очередь от него зависят производительность, потребляемая мощность, а следовательно, габариты и масса машины. Размерный ряд машин в рамках одного типа (т. е. группы машин, имеющих общее направление использования) строится именно по этому признаку. Рекомендациями Совета экономической взаимопомощи определен следующий предпочтительный ряд диаметров червяков в мм: 20; 25; 32; 45; 63; 90; 125; 160; 200; 250; 320; 400.

Длина червяка. Ее принято характеризовать отношением L/D, где D — диаметр червяка, L — длина части червяка, имеющей винтовую нарезку. Необходимая длина червяка, от которой непосредственно зависит время пребывания обрабатываемого материала в канале нарезки, пропорциональна длительности протекания того процесса, который определяет сущность данного вида обработки. Например, шприц-машины для экструзии профилей, питаемые лентой подогретой резиновой смеси (машины «горячего» питания), имеют меньшую длину червяка, чем машины «холодного» питания, так как в последнем случае помимо функции винтового насоса, продавливающего смесь через каналы головки, машина выполняет еще и функцию подогрева смеси.

СЭВ рекомендуется следующий ряд предпочтительных значений L/D для машин по обработке резиновых смесей: 5; 8; 10; 12. Процессы, протекающие в канале червяка при переработке термопластов, как правило, более длительны: поэтому рекомендуемые значения L/D для машин по переработке этих материалов больше: 15, 20; 25; 30; 35. Для специальных машин это отношение может быть увеличено до 40.

Число червяков в цилиндре машины. По этому признаку машины делятся на одночервячные, двухчервячные и многочервячные. Двух- и многочервячные машины, как правило, используются при переработке негранулированных, порошкообразных термопластов и композиций на их основе. Более эффективно применение этих машин при осуществлении процессов смешения и дегазации.

Расположение цилиндра. По расположению цилиндра машины делятся (рис. 4.3) на горизонтальные (рис. 4.3, *а—ж*), вертикальные с выходом материала вверх (рис. 4.3, *з*) и вертикальные с выходом материала вниз (рис. 4.3, *и*). Бóльшая часть конструкций относится к горизонтальным.

Вариант «*з*» иногда используют в агрегатах для производства рукавной пленки. В этих агрегатах предпочтительно верти-

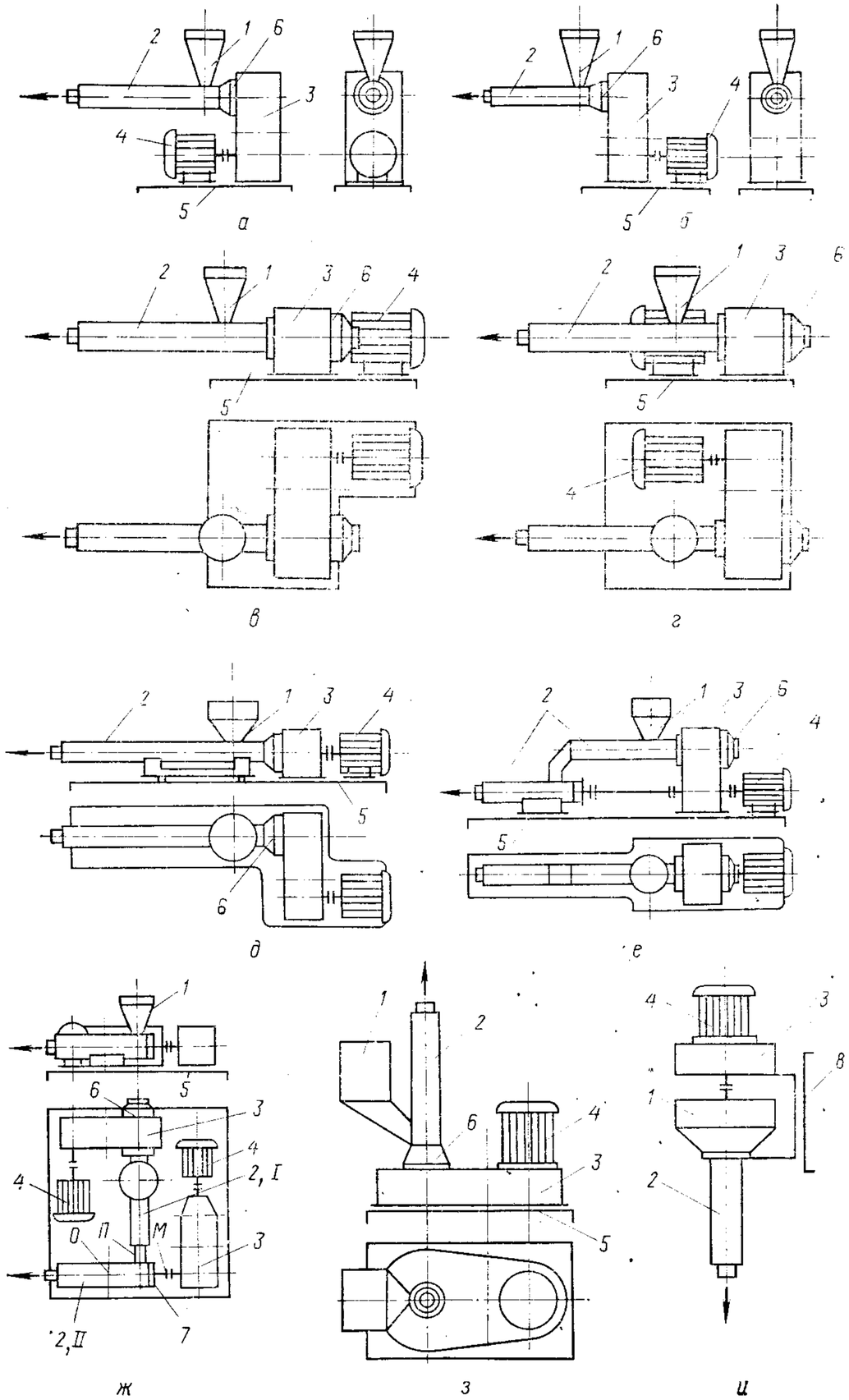


Рис. 4.3. Варианты схем расположения и взаимной компоновки узлов червячных машин:

1 — загрузочный бункер; *2* — цилиндр с червяком (2,I — цилиндр первой стадии; 2,II — цилиндр второй стадии); *3* — редуктор; *4* — двигатель; *5* — станина; *6, 7* — упорные подшипники; *8* — траверса пресса для переработки реактопластов.

кальное направление выдачи расплава из головки, так как в этом случае сила веса материала действует на экструдируемый из головки рукав в направлении его оси, существенно не искажая, таким образом, его конфигурацию. Вместе с тем нежелательно изменение направления потока расплава при переходе его из цилиндра в головку (это является общим требованием при экструзии всех типов изделий). Оба эти требования выполняются при расположении цилиндра червячной машины по варианту «*з*». При этом наиболее легко осуществляется также осциллирующее вращение экструдера вокруг оси цилиндра с целью равномерного распределения по ширине наматываемого рулона пленки продольных утолщений, неизбежно возникающих вследствие невозможности полного выравнивания скоростей выхода расплава во всех точках кольцевого формующего канала головки.

Вариант «*и*» удобен для пластикаторов-дозаторов, работающих совместно с прессами для переработки реактопластов, так как, во-первых, такая компоновка узлов машины наиболее компактна, а во-вторых, высота, на которой выдается из цилиндра доза подготовленного расплава реактопласта, соответствует высоте от пола верхней поверхности неподвижной половины пресс-формы, закрепленной на столе пресса. Путь транспортирования дозы расплава в форму в этом случае минимален. В этом случае он может быть укреплен на верхней траверсе пресса, выдавая дозу вниз, в устройство транспортирования его в форму, и совершенно не занимая площади пола у пресса.

Число комплектов «цилиндр — червяк». По этому признаку машины делятся на одностадийные (рис. 4.3, *а—д, з, и*) и двухстадийные (рис. 4.3, *е, ж*). Двухстадийные машины применяются, когда одновременное осуществление нескольких процессов с обеспечением оптимальных условий для каждого из них в одном цилиндре оказывается затруднительным при сохранении высокой производительности машины. Типичный пример такого процесса — приготовление гранулированных композиций на основе поливинилхлорида. Композиция подается в машину в виде сухой смеси компонентов (полимер, краситель, смазка, пластификатор и др.), состоящих из частиц размером 100—400 мкм, адсорбировавших на своей поверхности значительное количество атмосферной влаги.

Для подготовки расплава композиции, поступающего в грануляционную головку, необходимо осуществить следующие процессы: плавление полимера, дробление (диспергирование) агломератов красителя и прочих твердых компонентов до элементарных частиц, десорбция (путем нагрева) и удаление влаги и летучих, тщательное однородное распределение элементарных частиц в расплаве полимера, растворение пластификаторов, смазок (и прочих растворимых компонентов) в расплаве, нагнетание композиции в головку. Для предварительного нагрева, диспергирования (а попутно — и десорбции) и смешения наиболее

подходят двухчервячные машины (или машины с осциллирующим червяком). Завершение смешения, растворение и выдавливание с успехом могут быть выполнены одночервячной машиной. Таким образом, целесообразность использования машин по вариантам «*е*» или «*ж*» очевидна. Удаление летучих в машинах этого типа, как правило, осуществляется отсосом их из расплава в канале, соединяющем цилиндры первой (часто двухчервячной) и второй стадий машины.

Характер движения червяка. По этому признаку машины делятся на три группы. Первая группа — червяк имеет только вращательное движение, вторая группа — червяк вращается и одновременно совершает возвратно-поступательное осциллирующее движение, третья группа — червяк вращается и одновременно смещается в осевом направлении к загрузочному окну.

Подавляющее большинство разновидностей конструкций червячных машин относится к первой группе. Машины второй группы используются только как смесители (не менее эффективно, чем двухчервячные машины). Машины третьей группы — это пластикаторы-дозаторы, работающие совместно с прессами для реактопластов или входящие в состав литьевых и экструзионно-выдувных машин.

На рис. 4.4 приведена кинематическая схема механизма пластикации и впрыска литьевой машины. Осевое смещение червяка обусловлено в данном случае самим принципом дозирования. Червяк *4*, вращаясь, не выдавливает расплав из цилиндра *3* через выходное отверстие *1*, а накапливает его в передней части цилиндра, смещаясь вправо и высвобождая тем самым место для расплава, поступающего из винтового канала червяка. Когда требуемая доза расплава *2* накоплена, рабочая жидкость (масло) подается в полость *11* гидроцилиндра *10* и, воздействуя

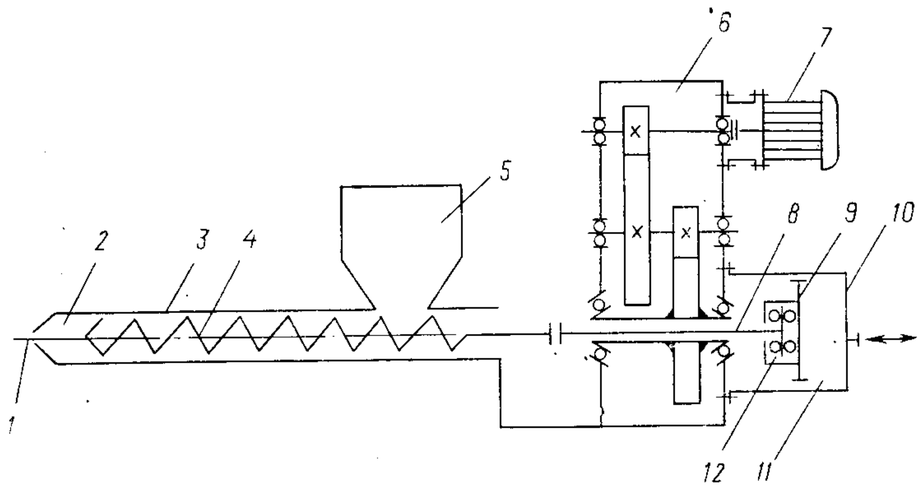


Рис. 4.4. Кинематическая схема механизма пластикации и впрыска литьевой машины:

1 — выходное отверстие цилиндра; *2* — подготавливаемая доза расплава; *3* — цилиндр; *4* — червяк; *5* — загрузочный бункер; *6* — редуктор; *7* — электродвигатель; *8* — шлицевой вал; *9* — поршень; *10* — гидроцилиндр; *11* — рабочая полость гидроцилиндра; *12* — упорный подшипник.

на поршень *9*, при помощи шлицевого вала *8* смещает червяк влево; при этом накопленная доза расплава выдавливается в литьевую форму (в случае, когда механизм является пластикатором-дозатором пресса, расплав выдавливается в емкость, транспортирующую дозу в пресс-форму).

Режим работы. По этому признаку различают машины, работающие в непрерывном (стационарном) и в периодическом (циклическом) режимах. В циклическом режиме работают пластикаторы-дозаторы прессов, литьевых и экструзионно-выдувных машин: на этих машинах реализуются циклические методы формования изделий. Все прочие машины (за редким исключением) работают в непрерывном режиме.

4.3.2. Конструктивные признаки

Компоновка узлов машины. Наиболее распространенные варианты компоновки приведены на рис. 4.2 и 4.3.

Первый фактор, определяющий компоновку — удобство обслуживания при эксплуатации. При работе машины оператор чаще всего имеет дело с бункером (периодическая загрузка материала в него, если операция не автоматизирована; контроль количества материала и проверка непрерывности подачи в загрузочное окно цилиндра) и с головкой (монтаж и демонтаж ее при переходе на новое изделие, смена фильтрующих сеток, визуальный контроль качества поверхности выходящего из головки экструдата и др.). Удобство обслуживания этих узлов обеспечено, если первый расположен на высоте от уровня пола до 1,8 м, а второй — на высоте 0,5—1,2 м.

При компоновке по вариантам «*а*», «*б*», «*з*» это требование может быть удовлетворено только для машин малых типоразмеров. С ростом типоразмера, определяемого диаметром червяка, растет также высота вертикального редуктора («*а*», «*б*») и длина цилиндра («*з*»), так что начиная с $D=90$ мм указанные требования по высоте трудно удовлетворить. При больших D оказываются целесообразными варианты «*в*»—«*ж*» с горизонтальным редуктором. Очевидно также, что вариант «*и*» при размещении пластикатора в верхней части пресса не удовлетворяет отмеченным требованиям.

Второй фактор — удобство монтажа и демонтажа узлов при ремонте. Рассмотрим действие этого фактора на примере возможных вариантов размещения упорного подшипника червяка. В схеме машины, приведенной на рис. 4.1, подшипник с корпусом размещен на задней стенке редуктора. Распространена также конструкция машин, в которых упорный подшипник установлен не на задней, а на передней (левой) стенке редуктора, так что секция *3* непосредственно скрепляется с корпусом *17* подшипника. В этом варианте корпус редуктора исключен из рассмотренной в разд. 4.2 силовой цепи и может быть выполнен менее прочным и металлоемким (варианты «*а*»—«*в*» на рис. 4.3).

Однако очевиден и недостаток этой конструкции: сложность снятия и установки подшипника при ремонте, так как при этом приходится снимать и цилиндр.

В машинах малых типоразмеров цилиндр относительно легкий, и отмеченный недостаток несуществен; исполнение подшипника по вариантам «*а*», «*б*», «*з*» возможно. Для машин средних типоразмеров предпочтительны варианты «*в*», «*г*» и вариант, показанный на рис. 4.1. Однако в машинах крупных типоразмеров осевое усилие на подшипнике достигает нескольких тысяч ньютонов. Нагружение корпуса редуктора столь значительным усилием нерационально, поэтому здесь вновь оказывается предпочтительным вариант «переднего» расположения подшипника (см. схемы «*д*» и «*ж*» для цилиндра второй ступени на рис. 4.3). Удобство же монтажа — демонтажа подшипника в варианте «*д*» обеспечивается тем, что цилиндр при отсоединении от подшипника может откатываться от него. В варианте «*ж*» удобство монтажа подшипника *7* обеспечено тем, что цилиндр второй стадии *2*, *II*, во-первых, полностью разобщен с редуктором, а во-вторых, после разобщения муфты *М* и переходника *П* может быть повернут вокруг монтажной оси *О* по часовой стрелке.

В приведенной на рис. 4.1 схеме электродвигатель *19* непосредственно укреплен на корпусе редуктора, так что реактивный момент, возникающий на статоре двигателя, передается на редуктор, минуя станину. Последняя, таким образом, полностью разгружена от рабочих усилий, возникающих в машине, и воспринимает только действие веса ее узлов. Конструкция ее поэтому может быть облегченной, однако недостаток такого монтажа двигателя аналогичен отмеченному выше.

Из рис. 4.2 видно, что в этой модели электродвигатель *1* смонтирован на станине, несмотря на то, что его можно было бы разместить под цилиндром *2*, почти в два раза уменьшив габариты машины в плане. Он расположен так потому, что легко может быть снят цеховыми грузоподъемными механизмами. Съем его облегчается еще и тем, что он соединен с горизонтальным редуктором *3* не трудно разбираемой муфтой, а клиноременной передачей *4*, заключенной в кожух.

Способ регулирования и поддержания рабочей температуры цилиндра. По этому признаку могут быть выделены машины с паровым, электрическим (омическим и индукционным) или масляным обогревом, а также с водяным или воздушным охлаждением. Преимущества и недостатки каждой из этих систем рассмотрены ниже.

Тип привода. По типу привода могут быть выделены машины: с электродвигателями постоянного тока, оснащенными различными схемами регулирования и стабилизации частоты вращения; с коллекторными электродвигателями переменного тока с бесступенчатой регулировкой частоты вращения; с асинхронными электродвигателями переменного тока, работающими совместно с вариаторами механического или гидравлического типа.

Таблица 4.1. Основные параметры и размеры одночервячных прессов

Типоразмер пресса	Частота вращения червяка, $с^{-1}$	Мощность привода червяка, кВт, не менее	Расстояние от основания пресса до оси червяка, мм	Габаритные размеры (длина×ширина×высота), м, не более	Масса пресса, т, не более
ЧП 20×20	0,21—4,3	2,2	1000	1,6×0,6×1,15	0,5
ЧП 32×20	0,81—3,5	6,0	1000	2,2×0,7×1,25	0,8
ЧП 45×20	0,15—3,0	11	1000	3,2×0,8×1,3	1,5
ЧП 63×20	0,12—2,5	25	1000	3,5×1,3×1,4	2,0
ЧП 90×20	0,10—2,1	55	1000	4,5×1,6×1,4	3,8
ЧП 125×20	0,091—1,3	100	1100	4,5×1,8×1,4	6,8
ЧП 160×20	0,091—1,3	125	1100	5,8×2,2×1,5	9,5
ЧП 200×20	0,067—0,9	180	1100	6,7×2,4×1,6	14,0

С целью расширения диапазона регулирования частоты вращения червяка в кинематическую схему его привода наряду с двигателем постоянного тока и вариатором может быть введена также двух- или трехступенчатая коробка передач (см., например рис. 4.2: здесь *5* — рычаг переключения передач).

Вследствие отмеченного многообразия конструкций червячных машин не все их типы стандартизованы. В СССР существуют только стандарты на машины для резиновых смесей (ГОСТ 11441—70) и ГОСТ 14773—69 «Прессы одночервячные для переработки термопластов».

Согласно ГОСТ 11441—70, выпускаются одночервячные машины четырех типов: МЧТ (машины с «теплым» питанием без вакуумотсоса), МЧТВ (машины с «теплым» питанием с вакуумотсосом), МЧХ (машины с «холодным» питанием без вакуумотсоса), и МЧХВ (машины с «холодным» питанием с вакуумотсосом).

Параметры технической характеристики машин, регламентируемые ГОСТ 14773—69, приведены в табл. 4.1. Первое число в обозначении типоразмера машины соответствует диаметру червяка, второе — отношению его длины к диаметру ($L/Д$). Этот ГОСТ касается только пластицирующих экструдеров и не распространяется на смесители-грануляторы, машины с вакуумотсосом и другие специальные машины. Нормативные документы на эту последнюю группу машин не создаются, так как выпускаются они сравнительно малыми партиями, а параметры и размеры их постоянно изменяются.

4.4. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗОНЫ КАНАЛА ЧЕРВЯКА

Качество выходящего из цилиндра расплава, производительность машины и затрачиваемая на вращение червяка мощность непосредственно зависят от силового взаимодействия материала с рабочими поверхностями червяка и цилиндра, а также от обусловленного этим взаимодействием механизма движения и прогрева материала в канале червяка. В разд. 4.4.1—4.4.3 рассмот-

рена сущность этих процессов при пластикации (прогреве и плавлении) термопластов, а в разд. 4.4.4 отмечаются особенности их протекания при переработке резиновых смесей и высоконаполненных композиционных материалов (в частности, реактопластов).

В обычной пластицирующей машине полимерный материал (за исключением резиновых смесей), перемещаясь по каналу червяка, проходит через три состояния: в начале — это твердый материал, затем — смесь расплава и твердого материала и, наконец, расплав. Для соответствующих этим состояниям участков канала (функциональных зон) приняты следующие названия: *зона питания,* или *зона загрузки; зона пластикации,* или *зона плавления,* или *переходная зона; зона расплава,* или *зона дозирования.*

4.4.1. Зона питания

Частицы материала в виде гранул или порошка из загрузочного окна *1* свободно просыпаются на винтовую поверхность *2* нарезки червяка и скатываются с нее под воздействием силы тяжести в направлении, указанном стрелками (рис. 4.5). При указанном стрелкой направлении вращения поверхность *2* перемещается вверх вместе с частицами, которые, продолжая ссыпаться с нее, в итоге смещаются влево. Таким образом, движущей силой процесса транспортирования материала является преимущественно сила его веса.

Свободному перемещению материала в канале препятствует сопротивление на выходе из цилиндра (например, в виде каналов головки), вследствие чего практически на всей длине червяка материал полностью заполняет канал и в нем развивается давление. Показанная на рис. 4.5 очередная порция материала, переместившись вдоль по цилиндру на небольшую длину, при-

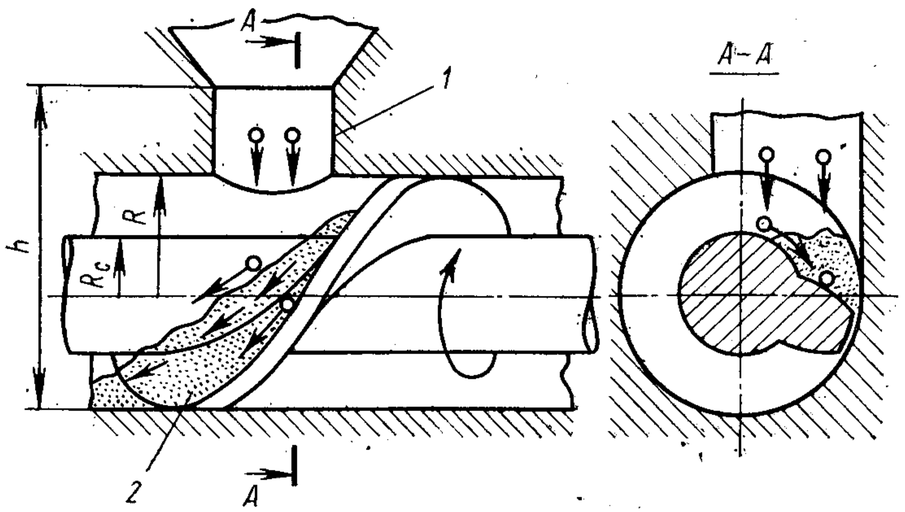


Рис. 4.5. Движение материала в канале червяка под загрузочным окном: *1* — загрузочное окно; *2* — винтовая поверхность нарезки червяка.

мерно равную одному шагу нарезки, встречает материал предыдущих порций (уже уплотнившийся и полностью заполнивший канал) и присоединяется к нему. В этой части канала вследствие развивающегося в уплотняемом материале давления на поверхностях контакта его с червяком и цилиндром возникает сила трения. Положительная разность между силами трения в парах материал — цилиндр и материал — червяк является основной движущей силой транспортирования на участке уплотненного твердого материала, и это является первым отличием движения уплотненного материала от движения рыхлого материала под загрузочным окном. Второе отличие состоит в том, что уплотненные частицы уже не могут свободно смещаться (пересыпаться) друг относительно друга и двигаются в канале как монолитная масса (пробка).

Приближенное представление о механизме движения уплотненного материала можно получить, сравнив его с гайкой, навинченной на винт — червяк. Если гайка не соприкасается ни с чем кроме винта, то при вращении его она начинает вращаться совместно с ним. Если же препятствовать повороту гайки, то она начинает перемещаться вдоль по оси винта поступательно, скользя по его нарезке. Препятствие провороту гайки — материала в рассматриваемом случае оказывает контактирующая с ним поверхность цилиндра, однако она не может полностью исключить вращательное движение материала, так что расстояние, на которое смещается полимер за один оборот червяка, несколько меньше шага нарезки. Чем больше отмеченная разность сил трения, тем больше величина этого смещения, тем, следовательно, больше производительность зоны питания и больше создаваемый ею напорный эффект, способствующий транспортированию материала в последующих зонах.

С целью увеличения производительности стремятся различными способами коэффициент трения пары материал — цилиндр увеличить, а пары материал — червяк — уменьшить.

Первый способ. Поверхность цилиндра выполняют шероховатой (иногда на ней делают множество мелких продольных канавок), а поверхность червяка тщательно полируют.

Второй способ. Из рис. 1.2 видно, что коэффициент трения у большинства полимеров значительно возрастает с ростом температуры T [нисходящие ветви кривых $f(T)$ соответствуют уже началу плавления полимера у поверхности скольжения и нарушению режима сухого трения]. В связи с этим стремятся поддерживать температуру цилиндра в зоне питания соответствующей области максимума функции $f(T)$ — как правило, в пределах 353—373 К.

Давление p, развивающееся в канале на выходе из зоны питания, создает усилие, действующее на материал этой зоны в направлении, противоположном направлению его движения. В противоположность разности сил трения, являющейся движущей силой $F_д$, сила, создаваемая давлением, является силой со-

противления движению $F_с$. Чем $F_с$ меньше по абсолютной величине и по сравнению с $F_д$, тем больше производительность зоны и тем в меньшей степени самопроизвольные, неконтролируемые пульсации давления сказываются на производительности Q. В этом случае говорят, что *напорно-расходовая характеристика*, т. е. функция $Q(p)$, обладает достаточной жесткостью.

Чтобы обеспечить достаточную жесткость напорно-расходовой (*рабочей*) характеристики зоны, стремятся увеличивать $F_д$ по отношению к $F_с$. Два возможных способа увеличения $F_д$ рассмотрены выше.

Третий способ. Он становится очевидным, если вспомнить, что $F_д$ есть результирующая баланса сил трения и, следовательно, представляет собой произведение давления в канале на коэффициент трения и на площадь поверхности трения, которая пропорциональна длине зоны. Величина же $F_с$ есть произведение давления на площадь поперечного сечения канала и, следовательно, от длины зоны не зависит. Таким образом, удлиняя зону, можно увеличивать $F_д$ по сравнению с $F_с$, обеспечивая тем самым бóльшие значения Q и большую жесткость характеристики $Q(p)$. У большинства универсальных червячных пластикаторов длина зоны питания составляет (4÷6) D.

Работа сил трения скольжения материала по стенкам канала превращается в тепло, выделяющееся на поверхностях и вызывающее нагрев как полимера, так и стенок канала. При этом температура стенки цилиндра может превысить температуру, соответствующую максимуму упомянутой функции $f(T)$. Это приведет к резкому уменьшению силы трения на поверхности цилиндра, препятствующей вращательному движению материала, и, следовательно, к уменьшению производительности. Во избежание этого избыточное количество генерируемого на поверхности цилиндра тепла отводят, оснащая часть цилиндра, соответствующую зоне питания, каналами водяного охлаждения. Поддержание оптимальной температуры цилиндра в зоне питания осуществляют регулированием расхода охлаждающей воды в каналах охлаждения.

4.4.2. Зона пластикации

Из зоны питания пробка твердого материала, движущегося по винтовому каналу червяка, попадает в зону пластикации. Температура цилиндра $T_ц$ в этой и следующих зонах, в отличие от зоны питания, значительно выше температуры плавления материала.

Механизм перехода термопластов в вязкотекучее состояние в этой зоне можно наглядно представить, рассмотрев картину транспортирования в обращенном движении, т. е. предположив, что червяк неподвижен, а цилиндр вращается с окружной скоростью V, равной реальной скорости гребня нарезки червяка. Зона пластикации охватывает несколько витков канала, поэто-

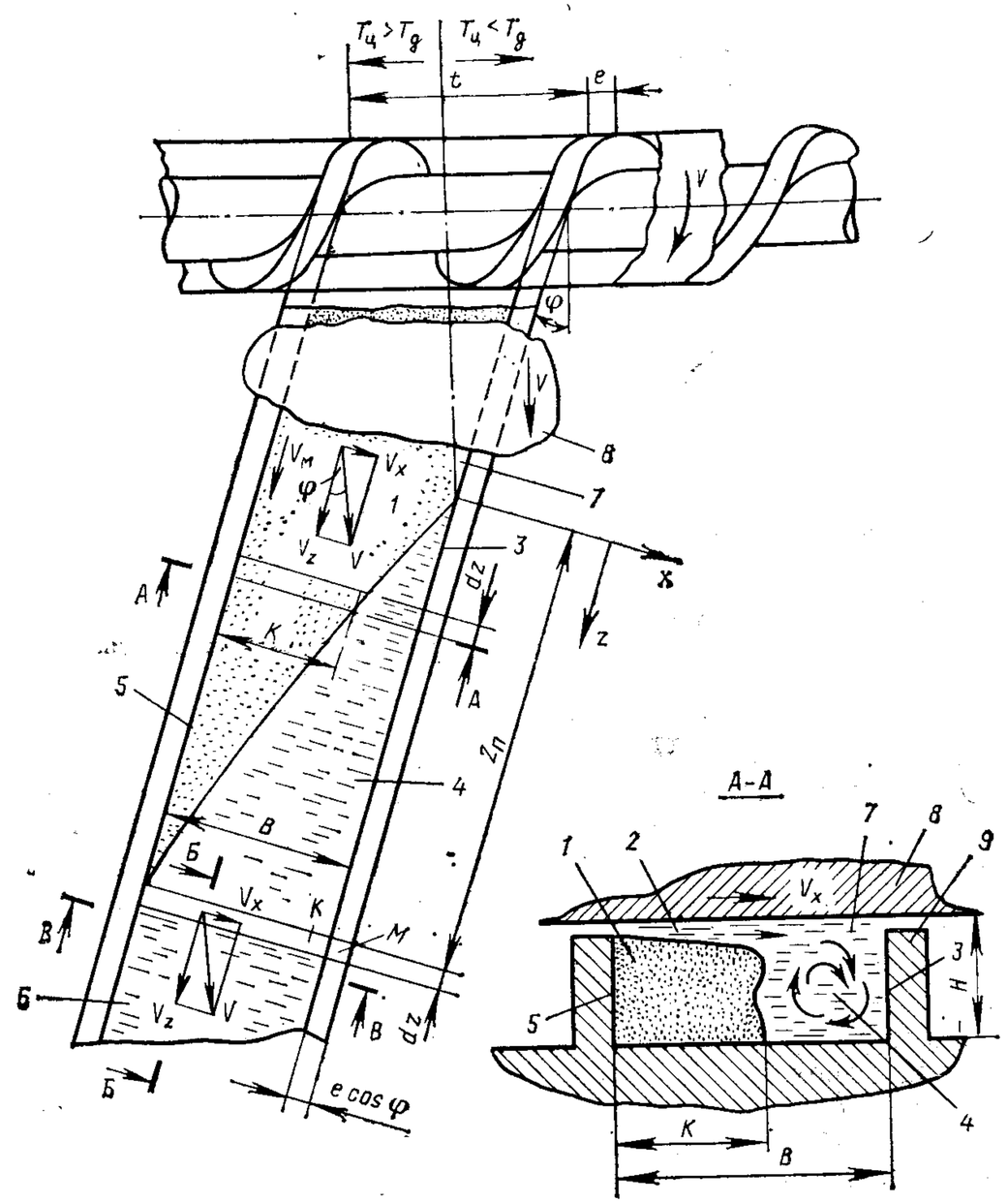


Рис. 4.6. Схема движения и плавления термопласта в зоне пластикации:
1 — твердый материал (пробка); *2* — пленка расплава; *3* — толкающая стенка нарезки червяка; *4* — область расплава; *5* — пассивная стенка канала; *6* — расплав в зоне дозирования; *7* — канал червяка; *8* — цилиндр; *9* — зазор между гребнем нарезки червяка и цилиндром.
Масштаб изображения вдоль оси *z* значительно уменьшен. Сечения *Б—Б* и *В—В* показаны на рис. 4.8.

му (также в целях наглядности) представим эту зону канала развернутой на плоскости (рис. 4.6).

Развертка имеет следующий вид. Плоский прямоугольный канал *7* накрыт плоской крышкой *8* (рабочей поверхностью цилиндра), смещающейся под углом φ по отношению к продольной оси канала *z* со скоростью V (здесь φ — угол подъема винтовой нарезки червяка). Твердый материал *1* движется вдоль канала со скоростью $V_м$. Как только твердый материал попадает в обогреваемую секцию цилиндра с температурой $T_ц$,

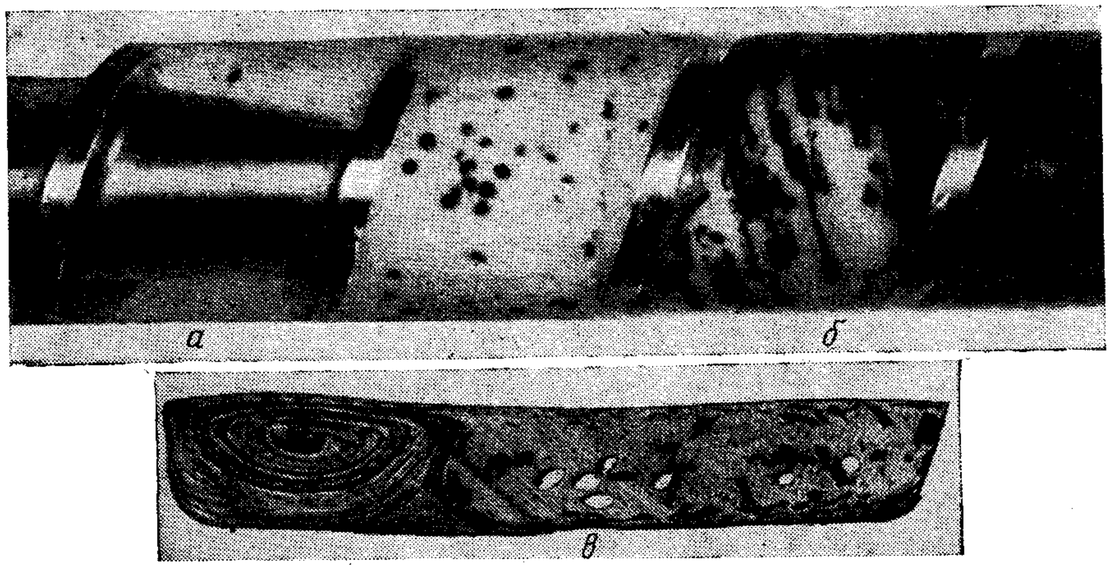


Рис. 4.7. Фотографии, иллюстрирующие процесс пластикации термопластов: *а* — материал в конце зоны питания; *б* — материал в начале зоны пластикации; *в* — поперечное сечение канала в зоне пластикации.

большей $T_д$, он начинает плавиться на поверхности контакта с цилиндром, образуя пленку расплава *2* (см. сечение канала *А—А*). Расплав прилипает к стенке цилиндра и увлекается ею к толкающей стенке *3* нарезки благодаря поперечной компоненте скорости цилиндра V_x. Пленка расплава, натолкнувшись на стенку *3*, как бы соскребается с цилиндра и скапливается перед стенкой *3*, образуя область расплава *4*, которая также начинает перемещаться вдоль канала.

По мере продвижения твердой пробки все бóльшая доля материала переходит из нее в пленку и затем в область расплава *4*, которая, расширяясь, оттесняет все уменьшающуюся по ширине пробку к пассивной стенке канала *5*. Процесс плавления можно было бы считать законченным в том месте канала, где ширина пробки K становится равной нулю; длина зоны пластикации в этом случае была бы равной $z_п$. Однако реально монолитность пробки *1* не сохраняется вплоть до конца ее плавления. При достижении $K=(0{,}1\div0{,}2)B$ (где B — ширина канала) прочность ее становится низкой, и развившимся в области *4* циркуляционным течением (показано стрелками) пробка разрывается на отдельные фрагменты и разносится по всему поперечному сечению канала. Вследствие этого реальная длина зоны пластикации, характеризующаяся рассмотренным механизмом плавления, несколько меньше $z_п$.

Фотографии, приведенные на рис. 4.7, иллюстрируют рассмотренный здесь механизм процесса пластикации термопластов.

Переход гранулированного или порошкообразного материала в расплав сопровождается уменьшением его объема, поэтому во

избежание образования пустот в канале и с целью надежного прижатия пробки к стенке цилиндра объем канала, приходящийся на один виток его, в зоне пластикации делают уменьшающимся по ходу материала. Снижение объема канала достигается уменьшением глубины канала H или шага нарезки t.

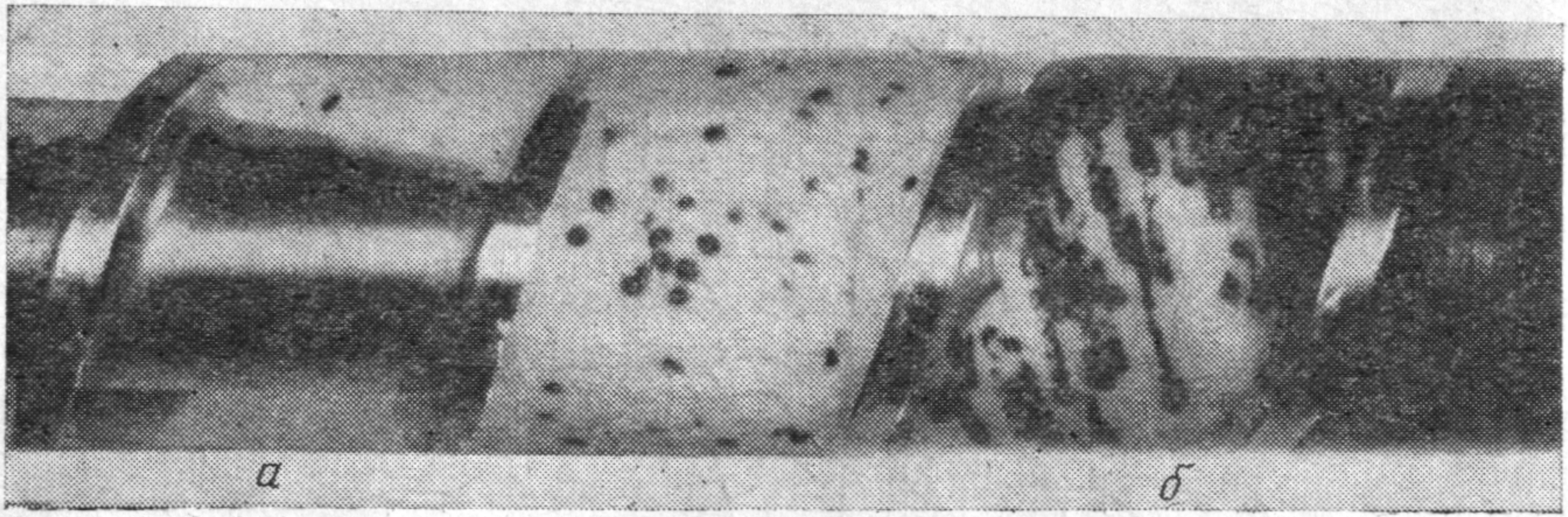
Толщина образующейся пленки *2* (рис. 4.6) очень мала: не превышает нескольких десятых долей мм, поэтому в ней из-за разности скоростей пробки $V_м$ и цилиндра V расплав подвергается чрезвычайно интенсивному сдвиговому деформированию. Преобразующаяся в тепло работа деформирования вносит значительный вклад в прогрев и плавление материала. Несколько меньший вклад от аналогичных по природе диссипативных тепловыделений наблюдается в области *4*. В высокоскоростных машинах диссипативные тепловыделения часто бывают достаточными для плавления и разогрева расплава по требуемой температуры. Обогрев цилиндра в этом случае включают только при пуске машины. Такой режим работы пластикаторов называют *автогенным*.

В заключение необходимо отметить, что рассмотренный пленочный механизм плавления не соблюдается для некоторых термопластов в порошкообразном состоянии. Кроме того, он может быть не столь явно выраженным при работе сильно изношенных червяков. В этом случае большой зазор *9* (см. рис. 4.6) между гребнем нарезки и цилиндром не препятствует уносу образовавшегося в пленке расплава в предыдущий виток, так что твердый материал *1* не отжимается к стенке *5*, оказывается посредине канала и разрушается гораздо скорее, вследствие чего область пленки с интенсивной теплогенерацией в ней исчезает, и интенсивность плавления резко уменьшается. Другие случаи нарушения пленочного режима плавления описаны в разд. 4.10.

Как правило, длина зоны пластикации составляет $(8\div12)D$.

4.4.3. Зона дозирования

Все сечение канала в зоне дозирования *6* (см. рис. 4.6) занято расплавом, в котором могут содержаться вкрапления отдельных непроплавленных (или частично оплавленных) гранул или их агломератов, образовавшихся при разрушении пробки твердого полимера в зоне пластикации. Скорости материала во всех точках сечения канала не равны по величине и не коллинеарны. Кинематика движения расплава в зоне дозирования столь сложна из-за того, что вектор скорости цилиндра V не параллелен оси канала z. Вид траектории каждой из материальных частиц определяется тем, что полный вектор скорости ее $\vec{v}$ можно представить как сумму двух компонент v_x и v_z, расположенных в плоскостях поперечного (*В—В*) и продольного (*Б—Б*) сечений канала (см. рис. 4.6 и 4.8), т. е. в плоскостях xy и yz.



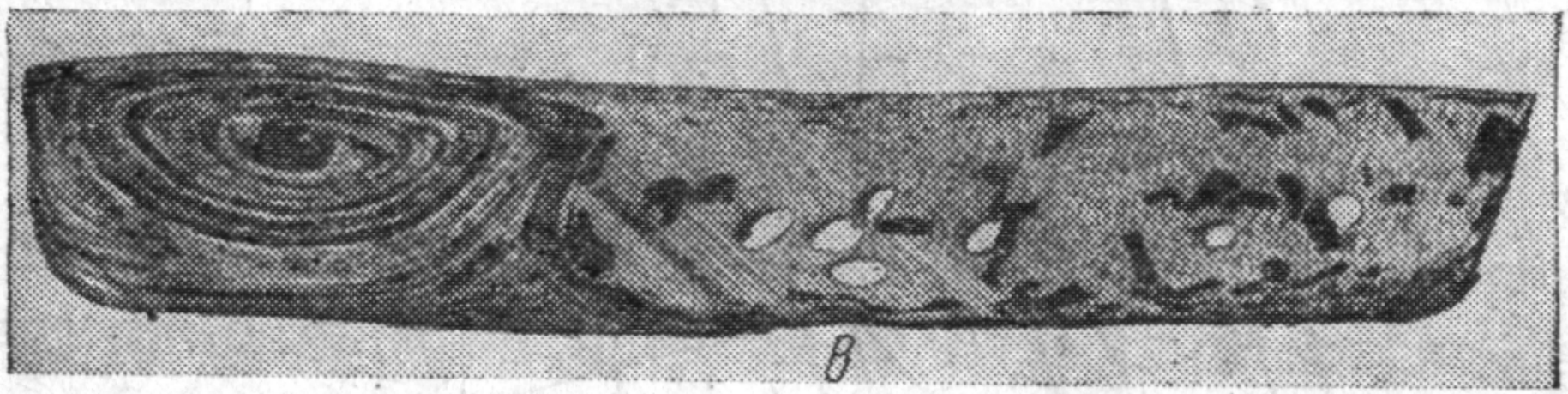


Рис. 4.7. Фотографии, иллюстрирующие процесс пластикации термопластов: *а* — материал в конце зоны питания; *б* — материал в начале зоны пластикации; *в* — поперечное сечение канала в зоне пластикации.

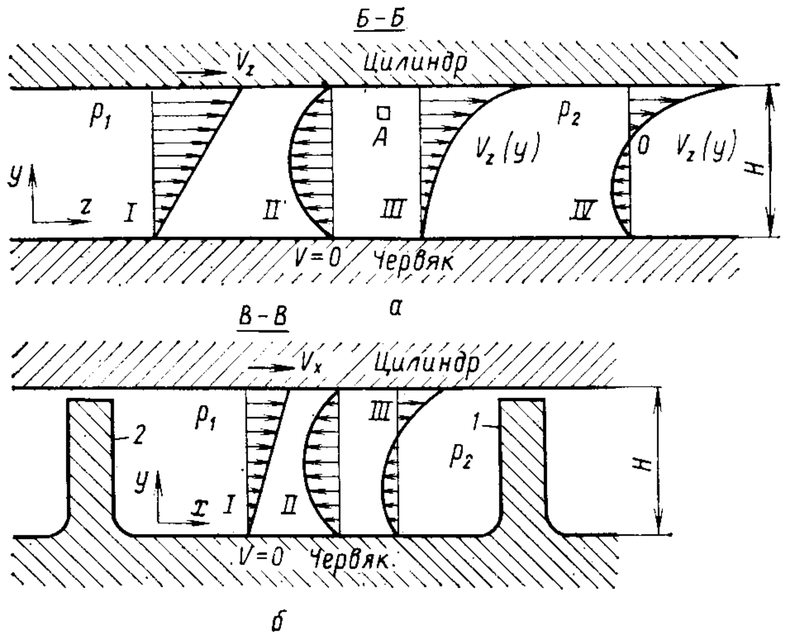


Рис. 4.8. Поля скоростей расплава в продольном (*а*) и поперечном (*б*) сечениях канала зоны дозирования (соответственно *Б—Б* и *В—В* на рис. 4.6). Пояснения в тексте.

Вследствие прилипания расплава к стенкам канала скорость его у стенок равна скорости самих стенок. Продольная компонента скорости цилиндра V_z (см. рис. 4.8) вызывает поток вдоль канала с эпюрой скоростей, показанной на рис. 4.8, *а* (поз. *I*). Этот поток называют *вынужденным*, так как движущаяся верхняя стенка канала именно вынуждает течь расплав в направлении к выходу из канала.

На выходе из канала, как правило, существует значительное давление, так что вынужденный поток направлен в сторону возрастания давления (на рис. 4.8, *а* давление p_1 больше давления p_2). Если бы верхняя стенка канала была неподвижной, то в нем под воздействием перепада давления $\Delta p = p_2 - p_1$ возник поток с эпюрой скоростей *II*. Направление этого потока противоположно вынужденному потоку, поэтому его принято называть *противотоком,* или *обратным потоком.* Результирующая эпюра скоростей потока вдоль канала при наличии как V_z, так и Δp есть сумма эпюр *I* и *II* (см. рис. 4.8, *а*, поз. *III*). Площадь под этой эпюрой определяет производительность зоны дозирования Q:

$$Q = B \int_0^H v_z(y)\, dy \qquad (4.1)$$

где H — глубина канала.

С ростом Δp обратный поток возрастает, производительность уменьшается, и суммарная эпюра $v_z(y)$ может принять вид, показанный на поз. *IV*. В области, прилегающей к червяку (ни-

же точки O, при которой $v_z = 0$), появляется поток, движущийся в направлении, противоположном выходу из канала. При дальнейшем росте Δp при некотором его значении $\Delta p_{макс}$ производительность Q становится равной нулю. Таким образом, из рассмотренного вид *рабочей характеристики* $Q(\Delta p)$ для зоны дозирования ясен.

В плоскости *xy* (рис. 4.8, *б*) картина течения во многом подобна рассмотренной. Поперечная компонента скорости цилиндра V_x вызывает поток с эпюрой скоростей *I*. Так как выход из канала в направлении *x* практически закрыт стенкой *1* нарезки, то при нагнетании к ней расплава у нее развивается давление p_2 большее, чем давление p_1 у пассивной стенки *2*. Вследствие возникшего в поперечном сечении перепада давлений $\Delta p = p_2 - p_1$ возникает поток с эпюрой скоростей *II*. Результирующая эпюра скоростей *III* в направлении, поперечном оси канала, $v_x(y)$ находится как сумма эпюр *I* и *II*. Таким образом, в верхней части канала расплав, увлекаемый стенкой цилиндра, натекает на толкающую стенку *1* нарезки; изменяя направление своей скорости, он стекает вдоль этой стенки в нижнюю часть канала, где образуется поток в направлении от стенки *1* к стенке *2*. Вернувшись к стенке *2* и поднявшись по ней вверх, расплав вовлекается цилиндром в новый виток циркуляции. Траектории частиц в поперечном потоке представляют собой замкнутые кривые (см. рис. 4.7, *в*), поэтому поперечный поток называется *циркуляционным.*

В процессе транспортирования материала в зоне дозирования происходит дальнейший прогрев расплава как от стенки цилиндра, так и за счет диссипативных тепловыделений в массе деформируемого материала, завершается также проплавление попавших в зону твердых частиц полимера. Циркуляционный поток способствует смешению областей полимера, имеющих различную температуру, т. е. усреднению температуры в поперечном сечении. Длина зоны дозирования для пластицирующего экструдера должна быть достаточной, чтобы за время пребывания в ней полимера в нем успели завершиться процессы плавления и температурной гомогенизации. Эта длина, как правило, составляет (4÷6) *Д*.

Если помимо пластикации и выдавливания через головку в экструдере должны выполняться еще какие-либо технологические операции (например, смешение неокрашенного полимера с окрашенным), то длина зоны дозирования должна быть достаточной также и для достижения требуемой степени завершенности данного конкретного процесса (например, достижения таких размеров неоднородностей материала по цвету, которые меньше разрешающей способности глаза).

В заключение необходимо отметить, что кинематика движения и характер прогрева расплава в области *4* зоны пластикации (см. рис. 4.6) подобны рассмотренным, так как единственное и не принципиальное отличие канала, в котором размеща-

ется область *4*, от канала зоны дозирования заключается в том, что одна из его стенок (см. рис. 4.6, сечение *А—А*) образована не гребнем нарезки, а поверхностью твердого полимера *1*.

4.4.4. Зоны канала червяка при переработке резиновых смесей и реактопластов

В отличие от термопластов резиновые смеси, поступающие на переработку в пластицирующую и выдавливающую червячную машину, представляют собой высоковязкие жидкости. При движении в канале принципиальных изменений в их свойствах не происходит, так что характер движения на всей длине канала остается практически неизменным и подобным рассмотренному для зоны дозирования при пластикации термопластов. В связи с этим четкого разграничения между зонами питания, пластикации и дозирования провести нельзя. Весь канал представляет собой одну зону, в которой смесь перемещаясь и деформируясь, подвергается прогреву практически полностью за счет работы ее деформирования.

Интенсивность диссипативных тепловыделений пропорциональна интенсивности деформирования материала в канале (чем меньше глубина канала червяка, тем выше интенсивность деформирования) и квадрату вязкости материала. По мере продвижения по каналу вязкость смеси вследствие прогрева значительно уменьшается, так что при неизменной геометрии канала на всей его длине интенсивность прогрева материала по мере его продвижения должна была бы резко снижаться. Во избежание этого процесс транспортирования в канале организуют таким образом, чтобы по мере продвижения интенсивность его деформирования возрастала. Добиваются этого, применяя червяки с монотонно уменьшающейся по ходу материала глубиной нарезки или уменьшающимся шагом нарезки.

Вязкость резиновых смесей значительно больше вязкости расплавов термопластов, и поэтому во избежание чрезмерной интенсивности тепловыделений в резиновой смеси, которая может привести к перегреву и преждевременной вулканизации ее, винтовой канал червяка для переработки резиновых смесей делают гораздо более глубоким, чем для переработки термопластов.

Характер движения высоконаполненных термореактивных композиций в зоне питания подобен таковому для термопластов, однако в остальных зонах он принципиально отличен. Отличие обусловлено большой разницей в свойствах этих материалов, и, следовательно, в поведении их при движении в каналах. Связующие высоконаполненных термореактивных композиций — олигомеры — имеют очень низкую вязкость, однако вследствие высокого содержания наполнителя отдельные его частицы, взаимно сцепляясь, образуют как бы единый «каркас», обладающий значительной прочностью. Таким образом, очень высокая вязкость расплавов этих композиционных материалов обусловлена не вязкостью связующего, а наличием этого «каркаса».

Как только такой материал попадает в обогреваемую секцию цилиндра червячного пластикатора, на его поверхности, контактирующей с цилиндром (а несколько позже — и на поверхности, контактирующей с червяком), связующее переходит в вязкотекучее состояние и образует на этой поверхности пленку низковязкой жидкости, являющейся по существу смазочным слоем между стенками канала и скользящим по ним материалом. Скольжение в режиме сухого трения в зоне питания сменяется, таким образом, не прилипанием к стенкам (как у термопластов), а скольжением в режиме жидкостного трения. По мере прогрева при движении в канале связующее плавится по всему объему материала, и он становится жидкостью. Здесь кончается зона пластикации. Однако из-за высокой вязкости расплав и в зоне дозирования по-прежнему скользит по стенкам, практически не деформируясь.

Это отличие в характере движения вызывает и некоторые особенности прогрева материала. У расплавов термопластов и резиновых смесей тепло генерируется непосредственно в массе деформируемого материала, прогревая его более или менее однородно по всему объему; при этом время прогрева зависит преимущественно от интенсивности диссипативных тепловыделений. При пластикации же реактопластов деформация их в канале практически отсутствует, тепло генерируется непосредственно на поверхностях скольжения и поступает в материал путем теплопроводности. Время прогрева в этом случае зависит не столько от интенсивности тепловыделений, сколько от теплопроводности материала и толщины прогреваемого слоя. При таком способе прогрева создается значительная температурная неоднородность расплава в направлении высоты канала, которая из-за отсутствия перемешивания в канале не исчезает полностью даже на выходе из него.

В зоне пластикации реактопласт проплавляется от поверхности к середине слоя в канале червяка. Под воздействием давления частицы перешедшего в расплав материала монолитизируются, а имеющийся между ними воздух отжимается к загрузочному окну. С целью повышения эффективности уплотнения, как и для термопластов, канал в зоне пластикации целесообразно выполнять уменьшающимся по высоте. Однако такие червяки неудобны в эксплуатации по следующей причине. При непредвиденных остановках пластикатора более чем на 10—15 мин в материале, находящемся в канале червяка, может произойти отверждение и тогда извлечь его из сужающегося к выходу канала, не вынимая червяка из цилиндра, невозможно. В связи с этим червяки для реактопластов выполняют с постоянной глубиной канала. В этом случае для извлечения отвер-

девшего материала достаточно снять с цилиндра головку и привести червяк во вращение, при этом материал в виде спиральной ленты вывинтится наружу.

4.4.5. Совместная работа функциональных зон

Напорно-расходовые (рабочие) характеристики всех рассмотренных зон одинаковы по виду (рис. 4.9). Чем больший напор Δp создается зоной, тем меньше ее производительность Q. Напор равен $\Delta p = p_в - p_{вх}$, где $p_{вх}$ и $p_в$ — давления на входе в зону и на выходе из нее соответственно.

Под *транспортирующей способностью* каждой зоны Q_0 (см. рис. 4.9) будем понимать производительность ее при перепаде давления вдоль зоны Δp, равном нулю. Такая производительность, в частности, имеет место, если на выходе из канала зоны нет препятствий свободному движению материала, а давление на входе в зону равно нулю.

Материал должен переходить из зоны в зону сплошным потоком без образования разрывов и пустот. Это соблюдается, если транспортирующая способность каждой предыдущей зоны Q_{0i} несколько больше фактической производительности последующей зоны Q_{i+1}:

$$Q_{i+1}(\Delta p_{i+1}) < Q_{0i} \qquad (4.2)$$

где i — порядковый номер зоны от загрузочного окна.

Предположим, например, что условие (4.2) не соблюдено и производительность зоны дозирования при давлении на выходе из нее, создаваемом головкой, больше транспортирующей способности зоны пластикации. Это значит, что зона дозирования будет стремиться отобрать из предыдущей зоны (зоны пластикации) такое количество материала, которое та не в состоянии поставить. Вследствие этого будут периодически возникать разрывы потока в месте стыковки зон, производительность зоны дозирования станет пульсирующей. Если же условие (4.2) соблюдено, то зона пластикации способна подавать даже несколько большее количество материала, чем фактически принимает от нее зона дозирования, поэтому, как видно из напорно-расходовой характеристики (см. рис. 4.9), зоной пластикации развивается напор Δp, давление в месте стыковки зон больше нуля и разрывы потока исключены.

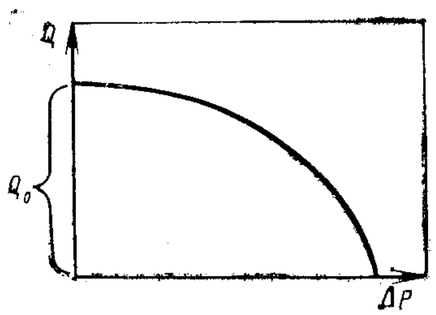


Рис. 4.9. Вид напорно-расходовой характеристики зон.

Точно такие же рассуждения можно провести и по отношению к

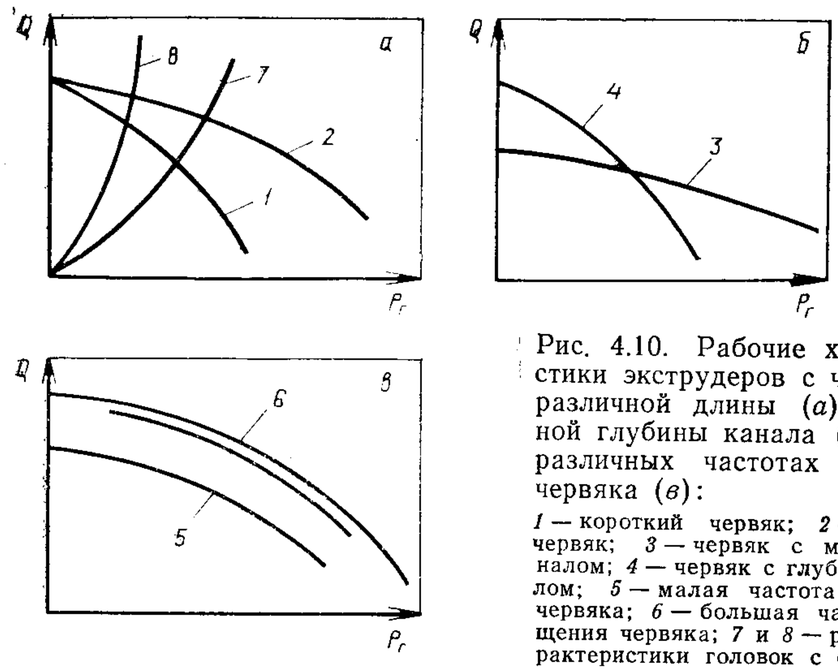


Рис. 4.10. Рабочие характеристики экструдеров с червяками различной длины (*а*), различной глубины канала (*б*) и при различных частотах вращения червяка (*в*):

1 — короткий червяк; *2* — длинный червяк; *3* — червяк с мелким каналом; *4* — червяк с глубоким каналом; *5* — малая частота вращения червяка; *6* — большая частота вращения червяка; *7* и *8* — рабочие характеристики головок с большим и малым гидравлическим сопротивлением соответственно.

зонам пластикации и питания. Однако в этом случае добавляется еще одно условие удовлетворительности взаимодействия зон: напор Δp, создаваемый зоной питания, должен быть достаточным для уплотнения материала и отжима из него воздуха. Для большинства материалов давление на выходе из зоны питания, равное 3—5 МПа, достаточно для их уплотнения.

При соблюдении соотношения (4.2) обеспечивается условие неразрывности потока и равенство производительности всех зон. Давление по всей длине канала монотонно возрастает, причем полное давление на выходе из канала (т. е. на входе в головку) $p_г$ есть сумма перепадов давления Δp_i, создаваемых каждой из зон:

$$p_г = \sum_{i=1}^{k} \Delta p_i(Q) \qquad (4.3)$$

где k — число зон.

Выражение (4.3) устанавливающее взаимосвязь между давлением на выходе из канала червяка $p_г$ и производительностью экструдера Q, называют его *рабочей характеристикой*. Конкретный вид ее определен, если известны напорно-расходовые характеристики каждой из зон. По виду рабочая характеристика экструдера также подобна показанной на рис. 4.9.

Рабочая характеристика помимо свойств материала существенно зависит от длины и глубины канала. Чем больше длина канала, тем больше движущая сила по сравнению с силой сопротивления движению от давления в головке (см. также

разд. 4.4.1, где уже подробно обсуждался вопрос о соотношении этих сил) и тем, следовательно, бóльшие давления может создавать червяк при той же производительности (рис. 4.10, *а*). Чем меньше глубина канала (т. е. площадь поперечного сечения его), тем меньше производительность при незначительных давлениях $p_г$. Однако с ростом $p_г$ сила сопротивления движению, равная произведению площади сечения канала на $p_г$, в мелких каналах возрастает менее интенсивно, чем в глубоких. По этой причине жесткость рабочей характеристики мелких червяков больше, чем глубоких, т. е. производительность Q снижается с ростом $p_г$ менее интенсивно, как видно из рис. 4.10, *б*).

При возрастании частоты вращения червяка рабочая характеристика экструдера смещается в сторону бóльших производительностей (рис. 4.10, *в*).

На рис. 4.10, *в* область оптимальных режимов работы экструдера показана на рабочей характеристике сдвоенной линией. При малых давлениях на выходе из канала червяка (участок рабочей характеристики слева от оптимальной области) материал уплотняется недостаточно, и в выходящем из экструдера расплаве могут появляться воздушные включения. При больших давлениях (участок справа от оптимальной области) рабочая характеристика становится нежесткой: даже незначительные случайные колебания давления вызывают существенные колебания производительности, что снижает стабильность размеров поперечного сечения экструдируемого изделия. Производительность на этом участке намного меньше возможной для данной машины. Наконец, из-за уменьшения производительности время пребывания материала в канале возрастает, что может приводить к его перегреву. Минимальные значения производительности в пределах оптимальной области составляют чаще всего 0,4—0,6 от транспортирующей способности.

4.4.6. Гидравлическое взаимодействие экструдера с головкой

При течении расплава через головку расход Q пропорционален давлению на входе в нее $p_г$. Функцию $Q(p_г)$ называют *рабочей характеристикой головки* (см. рис. 4.10, *а*). Чем у́же и длиннее каналы головки, тем больше ее гидравлическое сопротивление.

Точка пересечения рабочих характеристик экструдера и головки (*рабочая точка*) показывает то конкретное сочетание производительности и давления на входе в головку, которое имеет место при работе на данной головке при заданной частоте вращения червяка. Из рис. 4.10, *а*, ясно что с ростом, гидравлического сопротивления головки рабочая точка смещается в направлении снижения Q и роста $p_г$.

При конструировании головки необходимо определять положение рабочей точки на характеристике того экструдера, с которым она будет работать. С этой целью выполняют гидравли-

ческий расчет конструируемой головки, определяя при этом ее рабочую характеристику. Знание рабочей точки позволяет прогнозировать конкретное значение производительности при изготовлении данного изделия и давление в головке, необходимое для ее прочностного расчета, а также дает возможность определить, будет ли экструдер работать в оптимальной области рабочей характеристики.

4.5. ДВИЖЕНИЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗОНЕ ПИТАНИЯ

4.5.1. Уравнение баланса сил, действующих на материал

Так же, как и на рис. 4.6, взаимные смещения цилиндра, материала и червяка будем рассматривать в обращенном движении на развертке канала (рис. 4.11). Цилиндр движется относительно неподвижного канала с окружной скоростью V. Материал движется вдоль по каналу со скоростью $V_м$. Вектор относительной скорости скольжения цилиндра по материалу $V_{ц/м}$ направлен под углом α к продольной оси канала z.

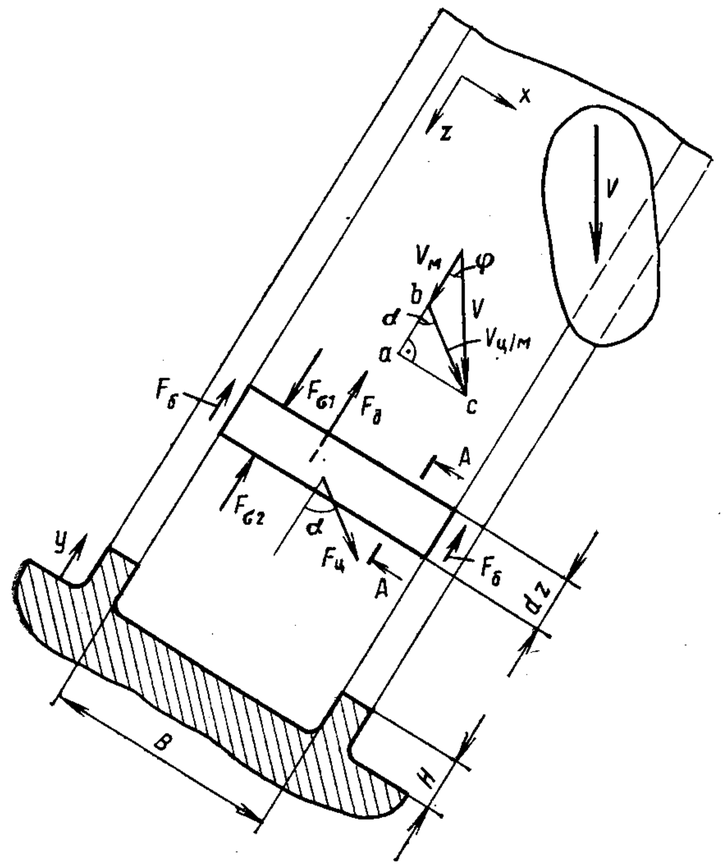


Рис. 4.11. Схема действия сил на материал в зоне питания. Пояснения в тексте.

В уплотняющемся материале развивается давление, возрастающее в направлении его движения. Под действием этого давления на поверхностях материала возникают силы трения.

Составим уравнение баланса сил, действующих на выделенный элемент материала размерами B, H и dz в направлении оси z (см. рис. 4.11). Примем следующие исходные положения:

1) касательные напряжения на поверхностях трения пропорциональны коэффициенту трения f и нормальным напряжениям на этих поверхностях;

2) направления касательных напряжений на поверхностях совпадают с направлением соответствующих скоростей скольжения;

3) нормальное напряжение, развивающееся в направлении относительных смещений частиц материала при его уплотнении (в данном случае напряжение σ_{zz} вдоль канала), больше напряжений σ_{xx} и σ_{yy} в двух других взаимно перпендикулярных направлениях и связано с ними коэффициентом бокового давления k (см. разд. 1.1.3):

$$\sigma_{xx} = k\sigma_{zz}; \qquad \sigma_{yy} = k\sigma_{zz}; \qquad k < 1 \tag{4.4}$$

4) изменения всех напряжений в направлении x практически отсутствуют, однако в направлении y вследствие кривизны канала их распределение неоднородно, так что напряжения на нижней и верхней поверхностях выделенного элемента существенно различны.

Уравнение проекций сил, действующих на элемент в направлении z, имеет вид:

$$F_{\sigma 1} + F_{\text{ц}} \cos\alpha - F_{\sigma 2} - F_{\text{д}} - 2F_{\text{б}} = 0 \tag{4.5}$$

где $F_{\sigma 1}$ и $F_{\sigma 2}$ — силы от нормальных напряжений σ_{zz}, действующих в поперечных сечениях канала; $F_{\text{ц}}$ — сила трения цилиндра о материал; $F_{\text{д}}$ и $F_{\text{б}}$ — силы трения дна и боковых поверхностей канала о материал соответственно.

Эти силы имеют следующие выражения:

$$F_{\sigma 1} = \tilde{\sigma}_{zz} BH; \qquad F_{\sigma 2} = (\tilde{\sigma}_{zz} + d\tilde{\sigma}_{zz})\, BH; \qquad F_{\text{ц}} = \sigma_{yy}\big|_{y=0} fBdz \tag{4.6}$$

$$F_{\text{д}} = \sigma_{yy}\big|_{y=H} fBdz\,(R_{\text{c}}/R); \qquad F_{\text{б}} = \tilde{\sigma}_{xx} fHdz \cdot 0{,}5\,(1 + R_{\text{c}}/R)$$

Вследствие отмеченной неоднородности напряжений в направлении y в выражения для $F_{\sigma 1}$, $F_{\sigma 2}$ и $F_{\text{б}}$ входят среднеинтегральные по высоте канала значения σ_{zz} и σ_{xx}:

$$\tilde{\sigma}_{zz} = \frac{1}{H}\int_0^H \sigma_{zz}(y)\, dy; \qquad \tilde{\sigma}_{xx} = \frac{1}{H}\int_0^H \sigma_{xx}(y)\, dy \tag{4.7}$$

Сомножители R_{c}/R и $0{,}5(1+R_{\text{c}}/R)$ в выражениях для $F_{\text{д}}$ и $F_{\text{б}}$ учитывают неравенство площадей нижней и верхней поверхностей элемента вследствие кривизны канала. Здесь R и R_{c} —

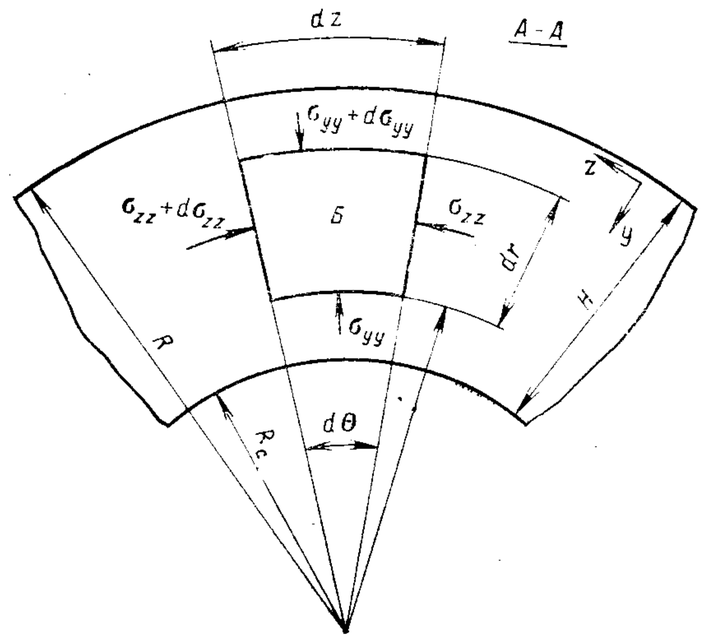


Рис. 4.12. Вид сечения A—A (см. рис. 4.11). Пояснения в тексте.

радиусы гребня и сердечника червяка соответственно (см. рис. 4.5).

Выражая σ_{xx} и σ_{yy} в соответствии с (4.4), вводя (4.6) в (4.5) и деля при этом каждое слагаемое на произведение $BH\,dz$, получаем следующее выражение баланса сил:

$$-\frac{d\tilde{\sigma}_{zz}}{dz} + \frac{fk}{H}\left[\sigma_{zz}\big|_{y=0}\cos\alpha - \sigma_{zz}\big|_{y=H}\frac{R_{\text{c}}}{R} - 2\sigma_{xz}\frac{H}{B}\cdot 0{,}5\left(1 + \frac{R_{\text{c}}}{R}\right)\right] = 0 \tag{4.8}$$

Взаимосвязь между $\tilde{\sigma}_{zz}$, $\sigma_{zz}|_{y=H}$ и $\sigma_{zz}|_{y=0}$ установим, рассмотрев силовое равновесие элемента материала $Б$ (рис. 4.12), выделенного из канала так, как это показано в сечении A—A (см. рис. 4.11). Само сечение A—A показано на рис. 4.12. В целях простоты рассуждений введем угловую координату θ и радиальную r, помня, что направления θ и z при малых значениях угла φ практически совпадают, а направления y и r противоположны. На рис. 4.12 показаны только те действующие на элемент напряжения, проекции которых на ось r (или y) не равны нулю. Сумма проекций сил, действующих на элемент, на направление r равна:

$$\sigma_{yy} r d\theta - (\sigma_{yy} + d\sigma_{yy})(r + dr)\, d\theta + (\sigma_{zz} + d\sigma_{zz})\, dr \operatorname{tg}(d\theta/2) + \sigma_{zz} dr \operatorname{tg}(d\theta/2) = 0 \tag{4.9}$$

В этом выражении в силу малости угла $d\theta$ правомерно следующее приближение:

$$\operatorname{tg}(d\theta/2) \approx 0{,}5 d\theta \tag{4.10}$$

Введя в (4.9) соотношение между σ_{yy} и σ_{zz} согласно (4.4), раскрыв скобки и отбросив получившиеся слагаемые малого по сравнению с другими порядка, получаем после деления каждого слагаемого на $rdrd\theta$ следующее уравнение:

$$\sigma_{zz}(1-k)\frac{1}{r}-k\frac{d\sigma_{zz}}{dr}=0 \qquad (4.11)$$

Разделяя в нем переменные σ_{zz} и r и решая его при граничных условиях:

$$\sigma_{zz}\big|_{r=R}=\sigma_{zz}\big|_{y=0}; \qquad \sigma_{zz}\big|_{r=r}=\sigma_{zz}(r) \qquad (4.12)$$

получаем выражение для распределения σ_{zz} по высоте канала:

$$\sigma_{zz}(r)=\sigma_{zz}\big|_{y=0}(r/R)^{\frac{1}{k}-1} \qquad (4.13)$$

В соответствии с определением выражение для среднеинтегральной в сечении величины $\tilde{\sigma}_{zz}$ имеет вид

$$\tilde{\sigma}_{zz}=\frac{1}{R-R_c}\int_{R_c}^{R}\sigma_{zz}(r)\,dr \qquad (4.14)$$

Вводя (4.13) в (4.14), получаем искомую взаимосвязь между $\sigma_{zz}\big|_{y=0}$ и $\tilde{\sigma}_{zz}$:

$$\sigma_{zz}\big|_{y=0}=\tilde{\sigma}_{zz}\frac{1-\bar{R}_c}{k}\left(1-\bar{R}_c^{\frac{1}{k}}\right)^{-1} \qquad (4.15)$$

где $\bar{R}_c=R_c/R$.

Подобное же выражение для $\sigma_{zz}\big|_{y=H}$ получаем, введя (4.15) в (4.13) и положив в нем $r=R_c$:

$$\sigma_{zz}\big|_{y=H}=\tilde{\sigma}_{zz}\frac{1-\bar{R}_c}{k}\left(1-\bar{R}_c^{\frac{1}{k}}\right)^{-1}\bar{R}_c^{\frac{1}{k}-1} \qquad (4.16)$$

Заменяя в (4.8) величины $\sigma_{zz}\big|_{y=0}$ и $\sigma_{zz}\big|_{y=H}$ их выражениями (4.15) и (4.16), получаем дифференциальное уравнение, описывающее распределение σ_{yy} по длине канала z:

$$\frac{fF_\alpha}{H}\tilde{\sigma}_{zz}=\frac{d\tilde{\sigma}_{zz}}{dz} \qquad (4.17)$$

где

$$F_\alpha=\frac{1-\bar{R}_c}{1-\bar{R}_c^{1/k}}\cos\alpha-\frac{1-\bar{R}_c}{1-\bar{R}_c^{1,k}}\bar{R}_c^{1/k}-k\frac{H}{B}(1+\bar{R}_c) \qquad (4.17a)$$

Интегрирование (4.17) при условии $\tilde{\sigma}_{zz}\big|_{z=0}=\sigma_0$ дает функцию $\tilde{\sigma}_{zz}(z)$:

$$\tilde{\sigma}_{zz}(z)=\sigma_0\exp(fF_\alpha z/H) \qquad (4.18)$$

Величину σ_0 на входе в зону питания можно приближенно принимать равной весу столба материала высотой h единичной площади (см. рис. 4.5):

$$\sigma_0=\rho g h \qquad (4.19)$$

где ρ — плотность материала в бункере цилиндра; g — ускорение свободного падения.

Если известна величина $\sigma_к$ на выходе из зоны питания, равная давлению на входе в зону пластикации, то из (4.18) получаем выражение для определения параметра F_α:

$$F_\alpha=\left(\ln\frac{\sigma_к}{\sigma_0}\right)f^{-1}\frac{H}{z_п} \qquad (4.20)$$

где $z_п=L_п/\cos\varphi$ (здесь $L_п$ — длина зоны питания, измеренная вдоль оси червяка).

Параметр F_α, как видно из (4.17а), связан с углом транспортирования α, определяющим производительность зоны.

4.5.2. Производительность зоны питания

Формула для объемной производительности Q зоны питания имеет вид

$$Q=V_м BH \qquad (4.21)$$

Взаимосвязь между $V_м$ и углом транспортирования α определена следующим тригонометрическим соотношением для треугольника abc векторной диаграммы на рис. 4.11:

$$\operatorname{ctg}\alpha=ab/bc; \qquad ab=V\cos\varphi-V_м; \qquad bc=V\sin\varphi \qquad (4.22)$$

Разрешая (4.22) относительно $V_м$ и вводя его в (4.21), получаем:

$$Q=BHV(\cos\varphi-\sin\varphi\operatorname{ctg}\alpha) \qquad (4.23)$$

Таким образом, производительность снижается с уменьшением угла транспортирования α, становясь равной нулю при $\alpha=\varphi$, что также понятно из векторной диаграммы на рис. 4.11.

Угол транспортирования α может быть вычислен по формулам (4.17 а) и (4.20), если известны величины σ_0 и $\sigma_к$. Может быть решена и обратная задача: определение давления, которое разовьется на выходе из зоны питания, если известна производительность Q последующих зон. Таким образом, формулы (4.17 а), (4.20) и (4.23) представляют собой напорно-расходовую характеристику зоны питания.

Интегрирование уравнения (4.17), в результате которого получено выражение (4.18), выполнено при условии независимости α от z. Реально же эта зависимость существует. Подвергаясь все большему давлению при движении в канале, материал уп-

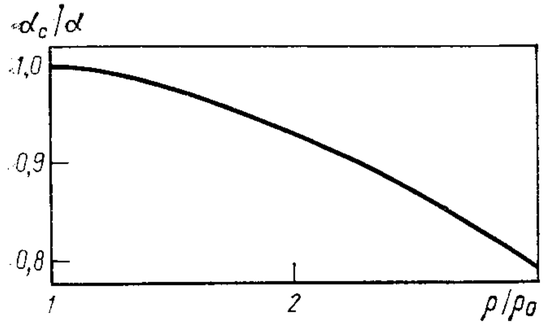


Рис. 4.13. Вид функции $\alpha_c/\alpha = f(\rho/\rho_0)$.

лотняется и уменьшается в объеме. Массовый расход G в любом сечении канала постоянен:

$$G = \rho V_м BH = \text{const} \qquad (4.24)$$

Поэтому если плотность ρ возрастает в направлении z, то скорость движения $V_м$ и, следовательно, α должны уменьшаться в этом направлении.

Точное решение задачи о силовом балансе для сжимаемого материала достаточно сложно и здесь не приводится. Приближенный расчет в этом случае возможен, если вычисленное по (4.17, а), (4.20) значение α перед введением его в (4.23) корректируется по графику, приведенному на рис. 4.13. На этом рисунке приведена зависимость отношения углов транспортирования в конце зоны питания для сжимаемого α_c и несжимаемого α материалов от отношения плотностей на выходе из зоны ρ и на входе в нее ρ_0 для червяка с углом нарезки $\varphi = 17°$.

4.5.3. Мощность, затрачиваемая на транспортирование материала

Мощность W, подводимая к червяку для его вращения, затрачивается, во-первых, на создание давления на выходе из зоны питания, во-вторых, превращается в тепло на поверхностях трения. Первая составляющая не превышает 5—12% от общей мощности, в связи с чем ею можно пренебречь.

Выражение для дифференциально малой мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения при движении по каналу показанного на рис. 4.11 элемента материала, имеет вид:

$$dW = F_ц V_{ц/м} + 2F_б V_м + F_д V_м \qquad (4.25)$$

Величина $V_{ц/м}$ определяется из векторной диаграммы на рис. 4.11:

$$V_{ц/м} = V(\sin\varphi/\cos\alpha) \qquad (4.26)$$

Получив выражения для $F_ц$, $F_б$ и $F_д$ так же, как и в предыдущем разделе, и используя выражения (4.26) и (4.22) для $V_{ц/м}$ и $V_м$ соответственно, приводим (4.25) к следующему виду:

$$dW = VkfBP_\alpha \tilde{\sigma}_{zz}(z)\, dz \qquad (4.27)$$

где

$$P_\alpha = \frac{1-\bar{R}_e}{k}(1-\bar{R}_c^{1/k})^{-1}\frac{\sin\varphi}{\cos\alpha} + \frac{H}{B}(1+\bar{R}_c)(\cos\varphi - \sin\varphi\,\mathrm{ctg}\,\alpha) +$$

$$+\frac{1-\bar{R}_c}{k}(1-\bar{R}_c^{1/k})^{-1}\bar{R}_c^{1/k}(\cos\varphi - \sin\varphi\,\mathrm{ctg}\,\alpha) \qquad (4.27а)$$

Вводя в (4.27) выражение (4.18) для распределения $\tilde{\sigma}_{zz}$ по длине канала и выполняя интегрирование по z от 0 до $z_п = L_п/\cos\varphi$, получаем формулу для расчета мощности привода червяка W, рассеиваемой в зоне питания:

$$W = \sigma_0 VkBH\,\frac{P_\alpha}{F_\alpha}\left[\exp\left(f\,\frac{F_\alpha L_п}{H\sin\varphi}\right) - 1\right] \qquad (4.28)$$

Давление в зоне питания и, следовательно, потребляемая зоной мощность интенсивно возрастают с уменьшением производительности и достигают максимума при равенстве производительности нулю, т. е. когда угол транспортирования α становится равным углу нарезки червяка φ [см. векторную диаграмму на рис. 4.11, а также формулу (4.23)]. Таким образом, максимально возможная потребляемая зоной мощность может быть рассчитана по формуле (4.28) [с использованием (4.17а) и (4.27а)] при условии $\alpha = \varphi$.

При обычных длинах зоны питания, не превышающих 3—4 диаметра червяка при $\varphi = 17°$, потребляемая ею мощность невелика: не более 10% от общей мощности, рассеиваемой в канале червяка.

4.6. ДВИЖЕНИЕ РАСПЛАВА В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ

4.6.1. Производительность зоны дозирования

Выделим в потоке расплава в канале элемент A бесконечно малых размеров так, как это показано на рис. 4.8. Напряжения на поверхностях элемента, действующие в направлении оси канала z, показаны на рис. 4.14. Проекция уравнения равновесия элемента на оси z имеет следующий вид:

$$(\tau_{yz} + d\tau_{yz})\,dzdx - \tau_{yz}dzdx + pdydx - (p+dp)\,dydx = 0 \qquad (4.29)$$

После преобразований получаем

$$\frac{dp}{dz} = \frac{d\tau_{yz}}{dy} \qquad (4.29а)$$

С учетом связи между напряжением сдвига τ_{yz} и соответствующей компонентой скорости сдвига $\dot{\gamma}_{yz} = dv_z/dy$

$$\tau_{yz} = \eta\,(dv_z/dy) \qquad (4.30)$$

уравнение (4.29) принимает вид

$$\frac{dp}{dz} = \eta\,\frac{d^2v_z}{dy^2} \qquad (4.31)$$

Входящая в (4.31) вязкость η, в соответствии с изложенным в разд. 1.3.1, зависит как от скорости сдвигового деформиро-

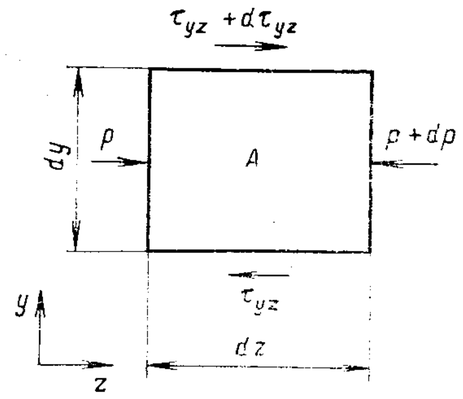


Рис. 4.14. Силы, действующие на элемент жидкости A (см. рис. 4.8) в направлении оси z.

вания $\dot{\gamma}$, так и от температуры расплава T:

$$\eta = m_0 f_1(\dot{\gamma})\, f_2(T) \qquad (4.32)$$

где m_0 — коэффициент, а

$$f_1(\dot{\gamma}) = \dot{\gamma}^{n-1};$$
$$f_2(T) = \exp[E/(RT)] \qquad (4.32а)$$

Как $\dot{\gamma}$, так и T, строго говоря, не постоянны по высоте канала H. Однако вследствие перемешивания расплава в поперечном сечении канала за счет циркуляционного потока (об этом было сказано в разд. 4.4.3), неоднородность температуры расплава в сечении относительно невелика. В связи с этим в дальнейшем приближенно примем, что T постоянна в направлениях y и x, а изменяется лишь в направлении z, так как расплав по мере продвижения по каналу прогревается. Величину $\dot{\gamma}(y)$ также приближенно примем постоянной в сечении и равной

$$\dot{\gamma} \approx V/H \qquad (4.33)$$

Выполняя интегрирование (4.31) дважды по y при граничных условиях

$$v_z|_{y=H} = V_z; \qquad v_z|_{y=0} = 0 \qquad (4.34)$$

(очевидных из рис. 4.8), а также при учете принятых приближений, получаем выражение, описывающее эпюру скоростей в направлении z:

$$v_z(y) = V_z \frac{y}{H} - \frac{H^2}{2\eta}\frac{dp}{dz}\left[\frac{y}{H} - \left(\frac{y}{H}\right)^2\right] \qquad (4.35)$$

Подобным же образом может быть получена формула для эпюры поперечной компоненты скорости $v_x(y)$:

$$v_x(y) = V_x \frac{y}{H} - \frac{H^2}{2\eta}\frac{dp}{dx}\left[\frac{y}{H} - \left(\frac{y}{H}\right)^2\right] \qquad (4.35а)$$

Истечение расплава из канала в направлении x отсутствует, если пренебречь утечками через зазор между гребнем нарезки и цилиндром, следовательно, расход в направлении x равен нулю:

$$\int_0^H v_x(y)\, dy = 0$$

Выполняя интегрирование выражения для $v_x(y)$ и приравнивая результат нулю, получаем соотношение для dp/dx:

$$dp/dx = 6\eta V_x/H^2$$

Вводя его в (4.35а), получаем формулу для $v_x(y)$:

$$v_x(y) = (V_x y/H)(3y/H - 2) \qquad (4.35б)$$

Выражение для расхода Q получаем, интегрируя (4.35) по всему поперечному сечению канала:

$$Q = B\int_0^H v_z(y)\, dy = \frac{V_z}{2} BHF_g - \frac{BH^3}{12\eta}\frac{dp}{dz}F_p \qquad (4.36)$$

где F_g и F_p — коэффициенты формы канала.

Первое слагаемое уравнения (4.36) представляет собой вынужденный поток, второе — противоток (обратный поток).

Приведенные здесь рассуждения выполнены в предположении, что боковые стенки канала не оказывают сопротивления течению. Реально же расплав прилипает к ним так же, как и к дну канала. По этой причине как вынужденный, так и обратный потоки меньше, чем полученные интегрированием (4.35). Этот факт учтен в (4.36) введением поправочных коэффициентов $F_д$ и $F_р$. Оба они меньше единицы, причем уменьшаются с ростом относительной глубины канала H/B, т. е. с ростом относительного влияния боковых стенок (рис. 4.15).

Для того, чтобы получить выражение для напорно-расходовой характеристики зоны дозирования $Q(\Delta p)$, где $\Delta p = p_2 - p_1$ — перепад давления на всей длине канала зоны дозирования $z_д$, необходимо выполнить интегрирование (4.36) по z на интервале от $z=0$ до $z=z_д$, принимая во внимание при этом, что вязкость η зависит от температуры T согласно (4.32), а последняя в свою очередь зависима от продольной координаты канала z. Конкретный вид функции $T(z)$ определен в следующем разделе.

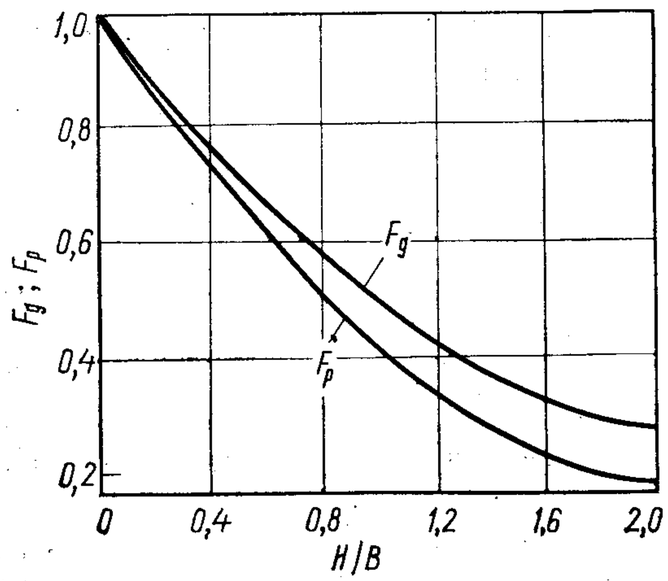


Рис. 4.15. Зависимость коэффициентов формы канала F_g и F_p от относительной глубины его H/B.

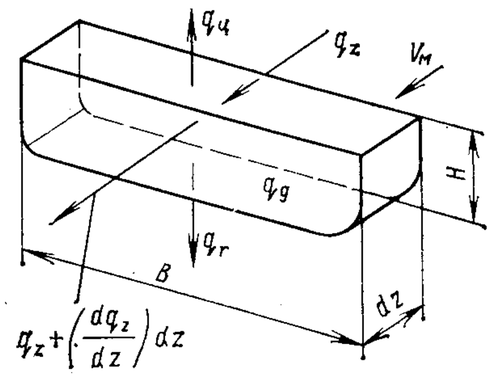


Рис. 4.16. Схема тепловых потоков для элементарного объема канала. Пояснения в тексте.

4.6.2. Изменение температуры расплава по длине зоны дозирования

Схема тепловых потоков, входящих в элементарный объем канала размерами B, H и dz и выходящих из него, показана на рис. 4.16. В направлении продольной оси канала z тепло переносится вместе с расплавом, средняя скорость которого $V_м$ составляет

$$V_м = Q/(BH) \tag{4.37}$$

При этом тепловой поток q_z равен

$$q_z = \rho c V_м T \tag{4.38}$$

где c — удельная теплоемкость расплава.

Дифференцируя (4.38) по z, получаем

$$dq_z/dz = \rho c V_м (dT/dz) \tag{4.38а}$$

За счет работы деформирования расплава в единичном объеме выделенного элемента генерируется диссипативный тепловой поток $q_д$:

$$q_д = \tau\dot{\gamma} = \eta\dot{\gamma}^2 \tag{4.39}$$

С учетом (4.32) и (4.32а) он может быть представлен в виде

$$q_д = m_0\dot{\gamma}^{n+1}\exp[E/(RT)] \tag{4.40}$$

Примем далее приближенно, что в (4.40) $\dot{\gamma}$ определено выражением (4.33), а температура равна среднеинтегральному ее значению по длине зоны $\widetilde{T}$:

$$\widetilde{T} = \int_0^{z_д} T(z)\,dz \tag{4.41}$$

Тепловые потоки $q_ц$ и $q_ч$, отводимые в тела́ цилиндра и червяка соответственно, пропорциональны коэффициенту теплоотдачи α и разности температур расплава и стенок цилиндра и червяка ($T_ц$ и $T_ч$). Принимая $T_ц \approx T_ч$, получаем:

$$q_ц = q_ч = \alpha(T - T_ц) \tag{4.42}$$

Коэффициент теплоотдачи α определяется соотношением

$$\alpha = k\lambda/H \tag{4.43}$$

где $k = 2 \div 3$, причем бо́льшие значения k соответствуют принудительно охлаждаемым червякам; λ — теплопроводность полимера.

Баланс рассмотренных тепловых потоков описывается уравнением:

$$q_z BH + q_д BH dz = [q_z + (dq_z/dz)\,dz]\,BH + q_ц B dz + q_ч B dz \tag{4.44}$$

Вводя в (4.44) выражения для тепловых потоков (4.38,а), (4.40) и (4.42) и деля каждое слагаемое на объем элемента ($B\,H\,dz$), с учетом (4.33) получаем

$$\rho c V_м \frac{dT}{dz} = m_0\left(\frac{V}{H}\right)^{n+1}\exp\frac{E}{R\widetilde{T}} - \frac{2k\lambda}{H^2}(T - T_ц) \tag{4.45}$$

Разделяя в (4.45) переменные и выполняя интегрирование при условии $T|_{z=0} = T_0$, где T_0 — температура расплава на входе в зону дозирования, получаем функцию $T(z)$

$$T(z) = T_ц + G\exp\frac{E}{R\widetilde{T}} - \left(G\exp\frac{E}{R\widetilde{T}} - T_0 + T_ц\right)\exp(-Az) \tag{4.46}$$

где

$$G = \frac{m_0 H^2}{2k\lambda}\left(\frac{V}{H}\right)^{n+1}; \qquad A = 2k\frac{a}{V_м H^2}; \qquad a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Вводя (4.46) в (4.41) и выполняя интегрирование, получаем трансцендентное уравнение для определения средней по длине зоны температуры $\widetilde{T}$:

$$\widetilde{T} = T_ц + G\exp\frac{E}{R\widetilde{T}}\left(1 + \frac{e^{-Az_д} - 1}{Az_д}\right) + (-T_0 + T_ц)\frac{e^{-Az_д} - 1}{Az_д} \tag{4.47}$$

Таким образом, по формуле (4.46), приняв $z = z_д$, можно рассчитать температуру расплава на выходе из цилиндра пластикатора, если известна температура T_0 на входе в зону дозирования.

Вычисление $\widetilde{T}$ по (4.47) целесообразно выполнять на ЭВМ посредством метода итераций (последовательных приближений), принимая в качестве исходного приближения $\widetilde{T} = T_ц$.

4.6.3. Напорно-расходовая характеристика зоны дозирования

Входящая в выражение (4.36) вязкость η зависит от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и температуры T в соответствии с формулой (4.32). Выражение для скорости сдвига примем подобным (4.33):

$$\dot{\gamma} \approx V/H \tag{4.48}$$

Температура материала T в канале червяка зависит от продольной координаты z в соответствии с (4.46), поэтому при выполнении интегрирования (4.36) по z разделим переменные следующим образом:

$$\frac{BH^3F_p}{6(V_z BHF_g - 2Q)}\,dp = \eta(z)\,dz \tag{4.49}$$

Вводя в (4.49) выражение для вязкости (4.32) с учетом приближения (4.33) и выполняя интегрирование при следующих граничных условиях

$$p\big|_{z=0} = p_1 \qquad (4.49) \qquad\qquad p\big|_{z=z_д} = p_2 \qquad (4.50)$$

(причем $p_2 - p_1 = \Delta p$), получаем:

$$\frac{BH^3F_p}{6(V_zBHF_g - 2Q)}\Delta p = m_0\left(\frac{V}{H}\right)^{n-1}\int_0^{z_д}\exp\frac{E}{RT(z)}\,dz \qquad (4.51)$$

Входящий в правую часть уравнения (4.51) интеграл, в котором $T(z)$ определена формулой (4.46), не может быть найден точно с помощью известных аналитических методов. Возможно приближенное интегрирование, например, по методу парабол с использованием следующего преобразования:

$$\int_a^b f(x)\,dx = \frac{b-a}{6}\left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b)\right] \qquad (4.52)$$

Применительно к рассматриваемому случаю преобразование (4.52) принимает вид

$$\int_0^{z_д} f(z)\,dz \approx \frac{z_д}{6}\left[f(0) + 4f\left(\frac{z_д}{2}\right) + f(z_д)\right] \qquad (4.53)$$

где

$$f(z) = \exp\frac{E}{RT(z)} = \exp\left\{\frac{E}{R}\left[T_ц + G\exp\frac{E}{R\tilde{T}} - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \left(G\exp\frac{E}{R\tilde{T}} - T_0 + T_ц\right)\exp\left(-\frac{2kaB}{QH}z\right)\right]^{-1}\right\} \qquad (4.54)$$

Вводя (4.53) в (4.51), получаем следующее выражение для напорно-расходовой характеристики $Q(\Delta p)$:

$$Q = \frac{V_z}{2}BHF_g - \frac{BH^3F_p}{12(V/H)^{n-1}m_0F_z}\frac{\Delta p}{z_д} \qquad (4.55)$$

где

$$F_z = 1/6\,[f(0) + 4f(z_д/2) + f(z_д)] \qquad (4.55а)$$

Уравнение (4.55) не разрешено относительно Q, так как правая его часть, а точнее, функция $f(z)$ [см. (4.54)] и, следовательно, F_z, также содержат Q. Вычисление Q по (4.55), (4.54) возможно методом последовательных приближений на ЭВМ, причем в качестве первого приближения по Q можно принимать ее значение, соответствующее только вынужденному потоку [первое слагаемое формулы (4.55)].

Возможны также варианты приближенных вычислений, приведенные ниже в порядке уменьшения точности получаемого результата.

Вариант 1. Примем приближенно, что температура расплава в канале червяка не зависит от продольной координаты z и равна среднеинтегральному значению по длине канала $\tilde{T}$, определяемому выражением (4.47).

Вводя в (4.54) приближение $T(z) \approx \tilde{T}$, получаем:

$$f(z) = \exp[E/(R\tilde{T})]; \qquad F_z = \exp[E/(R\tilde{T})]$$

В этом случае отпадает необходимость в отмеченной выше итеративной процедуре при вычислении Q по (4.55).

Вариант 2. Считаем, что процесс транспортирования расплава в зоне дозирования изотермический и температура расплава равна температуре цилиндра $T_ц$. Выражение для параметра F_z в этом случае имеет вид

$$F_z = \exp[E/(RT_ц)]$$

Вариант 3. Принимаем

$$F_z = \exp[E/(RT_ц)]; \qquad F_g = 1; \qquad F_p = 1$$

При вычислениях по (4.55) нужно иметь в виду следующие соотношения, очевидные из рис. 4.6:

$$V_z = V\cos\varphi; \qquad B = (t-e)\cos\varphi; \qquad z_д = L_д/\sin\varphi; \qquad V = \pi DN \qquad (4.56)$$

где t — шаг нарезки; e — ширина гребня нарезки; D — диаметр червяка; N — частота вращения червяка; $L_д$ — длина зоны дозирования, измеренная вдоль оси червяка.

4.6.4. Мощность, рассеиваемая в зоне дозирования

Элементарный участок стенки цилиндра K (см. рис. 4.6), имеющий размеры B и dz, смещается относительно червяка со скоростью V, компоненты которой V_x и V_z. Соответствующие компоненты силы сопротивления смещению этого участка dF_x и dF_z равны

$$dF_x = \tau_{yx}\big|_{y=H}Bdz; \qquad dF_z = \tau_{yz}\big|_{y=H}Bdz \qquad (4.57)$$

Выражение для элементарной мощности dW_1, расходуемой на перемещение участка стенки, имеет вид

$$dW_1 = V_xdF_x + V_ydF_y = V_x\tau_{yx}\big|_{y=H}Bdz + V_z\tau_{yz}\big|_{y=H}Bdz \qquad (4.58)$$

Входящие в (4.58) компоненты касательного напряжения τ связаны с соответствующими компонентами скорости сдвига следующим образом:

$$\tau_{yx}\Big|_{y=H} = \eta\frac{dv_x}{dy}\Big|_{y=H}; \qquad \tau_{yz}\Big|_{y=H} = \eta\frac{dv_z}{dy}\Big|_{y=H} \qquad (4.59)$$

Выражения для этих компонент скорости сдвига, полученные из формул (4.35б) и (4.35), имеют вид

$$\text{а)}\ \left.\frac{dv_x}{dy}\right|_{y=H}=\frac{4V_x}{H};\qquad \text{б)}\ \left.\frac{dv_z}{dy}\right|_{y=H}=\frac{V_z}{H}+\frac{H}{2\eta}\frac{dp}{dz} \tag{4.60}$$

Вводя (4.60) и (4.59) в (4.58) и выполняя интегрирование, получаем:

$$W_1=\frac{B}{H}(4V_x^2+V_z^2)\int_0^{z_д}\eta(z)\,dz+\frac{1}{2}BHV_z\int_{p_1}^{p_2}dp \tag{4.61}$$

Вводя в (4.61) известную функцию $\eta(z)$, определенную выражениями (4.32), (4.32а) и (4.46), и беря интегралы, получаем формулу для мощности W_1, расходуемой на смещение стенки цилиндра относительно канала нарезки червяка:

$$W_1=\frac{B}{H}(4V_x^2+V_z^2)\,m_0\left(\frac{V}{H}\right)^{n-1}z_д F_z+\frac{V_z}{2}BH\Delta p \tag{4.62}$$

где F_z — то же, что и в (4.55).

Первое слагаемое (4.62) определяет мощность, затрачиваемую на сдвиговое деформирование расплава в канале, второе — на создание перепада давления Δp. Возможны упрощенные варианты расчета по (4.62), изложенные ниже в порядке уменьшения точности получаемого результата: вариант 1 — при пренебрежении вторым слагаемым в (4.62); вариант 2 — при $\Delta p=0$ и $F_z=\exp(E/R\bar{T})$; вариант 3 — при $\Delta p=0$ и $F_z=\exp(E/RT_ц)$.

Мощность расходуется также на сдвиг в зазоре между гребнем нарезки и стенкой цилиндра. Эту составляющую общей мощности W обозначим W_2. Эта мощность, расходуемая на элементарном участке M (см. рис. 4.6) с размерами dz и $e\cos\varphi$, определяется следующим выражением:

$$dW_2=V\tau e\cos\varphi dz \tag{4.63}$$

Касательное напряжение τ, действующее в направлении окружной скорости V, при пренебрежении перепадом давления в зазоре равно

$$\tau=\eta\dot{\gamma} \tag{4.64}$$

где $\dot{\gamma}=V/\Delta$ (Δ — высота зазора).

Так как температура расплава в таком зазоре практически равна температуре стенки цилиндра $T_ц$, то вязкость η в данном случае не зависит от координаты z и в соответствии с (4.32) составляет

$$\eta=m_0(V/\Delta)^{n-1}\exp[E/(RT_ц)] \tag{4.65}$$

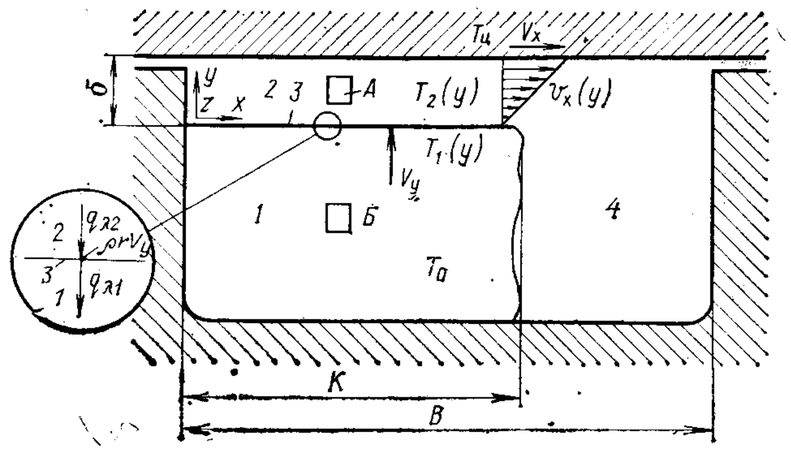


Рис. 4.17. Поперечное сечение канала в зоне пластикации:
1 — твердый полимер; *2* — пленка расплава; *3* — граница раздела; *4* — область расплава.

Вводя (4.64) и (4.65) в (4.63), получаем выражение для W_2:

$$W_2=V(V/\Delta)^n m_0\exp[E/(RT_ц)]\,z_д e\cos\varphi \tag{4.66}$$

Полная мощность, расходуемая в зоне дозирования, равна

$$W=W_1+W_2 \tag{4.67}$$

4.7. РАБОТА ЗОНЫ ПЛАСТИКАЦИИ В РЕЖИМЕ ПРИЛИПАНИЯ К СТЕНКАМ КАНАЛА

4.7.1. Переход материала в вязкотекучее состояние

Поперечное сечение канала в зоне пластикации показано на рис. 4.17. Твердый полимер в области *1*, сжимаясь под действием давления, развившегося в области расплава *4*, поступает к границе раздела *3* между твердым полимером *1* и пленкой расплава *2* со скоростью V_y. Из пленки расплав уносится в направлении x со скоростью $v_x(y)$.

Температура материала на границе раздела *3* соответствует практическому отсутствию его текучести в сравнении с основной массой материала в области пленки *2*; назовем ее температурой потери текучести $T_{пт}$. В области пленки температура расплава составляет $T_2(y)$. Температура твердой области в непосредственной близости от границы раздела равна $T_1(y)$; на значительном удалении от границы она практически равна начальной температуре полимера T_0.

Дифференциальное уравнение теплового баланса для области *2* имеет вид:

$$\lambda\frac{d^2T_2}{dy^2}+\eta\dot{\gamma}^2=0 \tag{4.68}$$

Граничные условия для этого уравнения:

$$T_2\big|_{y=0} = T_{пт}; \qquad T_2\big|_{y=\delta} = T_ц \tag{4.69}$$

Уравнение (4.68) получено следующим образом. Выделим из области *2* элементарный объем *A* с бесконечно малыми размерами *dx*, *dy*, *dz* (см. рис. 4.17). Изменение температуры T_2 в направлении *x* гораздо менее интенсивно, чем в направлении *y*. В связи с этим тепловыми потоками в направлении *x* пренебрегаем. Через элемент *A* в направлении *y* тепло передается путем теплопроводности; соответствующий тепловой поток $q_{\lambda 2}$ равен

$$q_{\lambda 2} = -\lambda\,(dT_2/dy)$$

Дифференцируя это выражение по *y*, получаем

$$\frac{dq_{\lambda 2}}{dy} = \frac{d}{dy}\left(-\lambda\,\frac{dT_2}{dy}\right)$$

При деформировании материала в элементе *A* генерируется диссипативный тепловой поток $q_д$, определяемый формулой (4.39). Уравнение баланса этих тепловых потоков имеет вид:

$$[q_\lambda + (dq_\lambda/dy)\,dy]\,dxdz - q_\lambda dxdz + q_д dxdydz = 0$$

Вводя в это уравнение выражения для q_λ и $q_д$, раскрывая скобки и деля каждое слагаемое на объем элемента *dxdydz*, получаем уравнение (4.68).

Вязкость материала η в уравнении (4.68) зависит в соответствии с формулой (4.32) как от скорости сдвига $\dot\gamma$, так и от температуры расплава в пленке T_2. Упрощая решение задачи, приближенно примем, что вязкость расплава постоянна во всей области пленки, причем значение ее соответствует температуре, равной температуре цилиндра $T_ц$.

Скорость сдвига в пленке также приближенно будем считать постоянной и равной средней ее величине $\dot\gamma$:

$$\tilde{\dot\gamma} \approx V_{ц/м}/\tilde\delta \tag{4.70}$$

где $V_{ц/м}$ — скорость движения цилиндра относительно твердого материала, показанная на векторной диаграмме на рис. 4.11.

Величина $V_{ц/м}$ определяется следующим соотношением:

$$V_{ц/м} = \sqrt{V^2 + V_м^2 - 2VV_м\cos\varphi} \tag{4.71}$$

Средняя по длине зоны толщина пленки $\tilde\delta$, входящая в уравнение (4.70), может быть приближенно определена одним из двух способов, изложенных на с. 160.

Выполняя интегрирование (4.68) при условиях (4.69) и с учетом сделанных допущений относительно величин η и $\dot\gamma$, получаем решение:

$$T_2(y) = T_{пт} + (T_ц - T_{пт})\left[\frac{\eta\,(T_ц, \tilde{\dot\gamma})}{2\lambda\,(T_ц - T_{пт})}\left(\frac{V_{ц/м}}{\delta}\right)^2 y(\delta - y) + \frac{y}{\delta}\right] \tag{4.72}$$

В соответствии с условием отсутствия текучести материала на границе раздела *3* (см. рис. 4.17) приближенно примем, что

вязкость материала здесь в 5—6 раз больше, чем при температуре цилиндра $T_ц$. Тогда, принимая во внимание выражение (4.32а), описывающее зависимость вязкости от температуры, можем записать следующее уравнение для определения величины $T_{пт}$:

$$\eta\big|_{T_{пт}} = (5 \div 6)\;\eta\big|_{T_ц}, \quad \text{или} \quad \exp[E/(RT_{пт})] = (5 \div 6)\exp[E/(RT_ц)] \tag{4.72а}$$

Распределение температуры $T_1(y)$ в области твердого полимера определяется уравнением теплового баланса

$$V_y\,\frac{dT_1}{dy} = a\,\frac{d^2T_1}{dy^2} \tag{4.73}$$

(где *a* — температуропроводность) при следующих граничных условиях:

$$T_1\big|_{y=0} = T_{пт}; \qquad T_1\big|_{y=-\infty} = T_0 \tag{4.74}$$

Уравнение (4.73) получено следующим образом. Выделим из области *1* элементарный объем *Б* с бесконечно малыми размерами *dx*, *dy* и *dz* (см. рис. 4.17). Материал перемещается в направлении *y* со скоростью V_y; соответствующий конвективный тепловой поток $q_к$ имеет выражение, подобное (4.38):

$$q_к = \rho c V_y T_1$$

Дифференцируя его по *y*, получаем

$$\frac{dq_к}{dy} = \rho c V_y\,\frac{dT_1}{dy}$$

Материал области *1* прогревается за счет тепла, подводимого от горячей поверхности раздела *3* путем теплопроводности; выражение для этого теплового потока $q_{\lambda 1}$ полностью подобно приведенному на с. 158.

Уравнение баланса этих тепловых потоков для элемента *Б* имеет вид

$$\left(q_{\lambda 1} + \frac{dq_{\lambda 1}}{dy}\,dy\right)dxdz + \left(q_к + \frac{dq_к}{dy}\,dy\right)dxdz - q_{\lambda 1}dxdz - q_к dxdz = 0$$

Вводя в это уравнение выражения для $q_{\lambda 1}$ и $q_к$, раскрывая скобки и деля каждое слагаемое на объем элемента *dxdydz*, получаем уравнение (4.73), в котором температуропроводность *a* равна отношению $\lambda/\rho c$.

Выполняя интегрирование (4.73) при условиях (4.74), получаем решение:

$$T_1(y) = T_0 + (T_{пт} - T_0)\exp(V_y y/a) \tag{4.75}$$

От области *2* (см. рис. 4.17) к границе раздела *3* поступает тепловой поток $q_{\lambda 2}$. В непосредственной близости от границы *3* он частично расходуется на плавление материала области *1*, поступающего к границе со скоростью V_y, так что в массу области *1* поступает уже поток $q_{\lambda 1}$, несколько меньший, чем $q_{\lambda 2}$:

$$q_{\lambda 2} = \rho r V_y + q_{\lambda 1}, \quad \text{или} \quad \lambda\,\frac{dT_2}{dz}\bigg|_{y=0} = \rho r V_y + \lambda\,\frac{dT_1}{dy}\bigg|_{y=0} \tag{4.76}$$

где ρ — плотность материала; *r* — скрытая теплота плавления материала.

Выражения для входящих в уравнение (4.76) производных определим из (4.72) и (4.75) и введем результаты в (4.76):

$$(T_{ц} - T_{пт})/\delta + \eta V^2_{ц/м}/(2\lambda\delta) = \rho r V_y + \lambda (T_{пт} - T_0) V_y/a \qquad (4.77)$$

Материальный поток $M_{1/2}$, проходящий через границу раздела *3* в область пленки *2* (см. рис. 4.17) на единице длины канала

$$M_{1/2} = V_y K \cdot 1 \qquad (4.78)$$

равен материальному потоку $M_{2/4}$ из пленки *2* в область расплава *4* на этой длине:

$$M_{2/4} = 1 \cdot \int_0^{\delta} v_x(y)\, dy \qquad (4.79)$$

Принимаем на основе введенного ранее допущения $\dot{\gamma} \approx \text{const}$ функцию $v_x(y)$ линейной, как это показано на рис. 4.17:

$$v_x(y) = (V_x/\delta)\, y$$

Выполняя интегрирование (4.79) и приравнивая полученное выражение к (4.78), получаем:

$$\delta = 2 (V_y/V_x) K \qquad (4.80)$$

Вводя (4.80) в (4.77), получаем формулу для расчета скорости плавления материала V_y:

$$V_y = F_V K^{-1/2}$$

где

$$F_V = \left\{\left(T_{ц} - T_{пт} + \eta \frac{V^2_{ц/м}}{2\lambda}\right) \frac{aV_x}{2[r/c + (T_{пт} - T_0)]}\right\}^{1/2} \qquad (4.81)$$

Входящая в (4.81) вязкость η расплава в области пленки в соответствии с формулой (4.32) и введенными в начале раздела допущениями имеет следующее выражение:

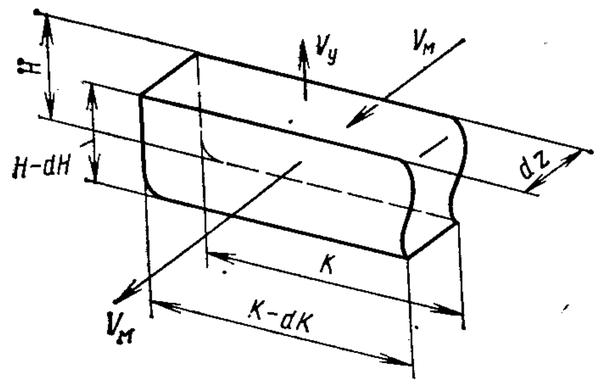
$$\eta(T_{ц}, \tilde{\dot{\gamma}}) = m_0 (V_{ц/м}/\tilde{\delta})^{n-1} \exp[E/(RT_{ц})] \qquad (4.81а)$$

Средняя по длине зоны пластикации толщина пленки $\tilde{\delta}$ может быть рассчитана одним из следующих двух возможных способов.

Первый способ. Вводя (4.81а) и (4.81) в (4.80) и принимая $K \approx 0{,}5\ B$, получаем трансцендентное уравнение относительно средней по длине зоны величины $\tilde{\delta}$. Решение его целесообразно выполнять на ЭВМ.

Второй способ. Приближенно принимаем $\tilde{\delta} \approx 0{,}05\ H$.

Рис. 4.18. Элементарный объем канала, занятый областью твердого полимера. Пояснения в тексте.



4.7.2. Длина зоны пластикации

Интенсивность уменьшения ширины K области твердого полимера (см. рис. 4.6) по длине канала z, а также длина зоны пластикации $z_{пл}$ определяются уравнением материального баланса, вывод которого представлен ниже.

На рис. 4.18 показан выделенный из канала элементарный объем, занимаемый твердым полимером. Толщина этого элемента dz. Размеры задней грани H и K. Высота передней грани меньше, чем задней на величину dH, так как глубина канала в зоне пластикации переменная, уменьшающаяся по направлению к выходу из нее. Ширина этой грани также меньше, чем задней, на величину dK, так как функция $K(z)$ — убывающая.

Через заднюю грань входит материальный поток со скоростью $V_м$, равный $HKV_м$. Через переднюю и верхнюю грани выходят потоки $(H—dH)(K—dK)V_м$ и $KdzV_y$ соответственно. Уравнение баланса потоков имеет вид

$$HKV_м = (H - dH)(K - dK)V_м + KdzV_y \qquad (4.82)$$

или

$$-\frac{d}{dz}(KH) = \frac{V_y}{V_м} K$$

Как правило, червяки в зоне пластикации выполняются с коническим сердечником, так что функция $H(z)$ имеет вид

$$H(z) = H_п - \varkappa z \qquad (4.83)$$

где $\varkappa = (H_п — H_д)/z_{пл}$; $H_п$ и $H_д$ — глубина канала в зонах питания и дозирования соответственно.

Вводя в (4.82) формулу (4.83) и выражение для V_y (4.81), разделяя затем переменные z и K и выполняя интегрирование при граничных условиях

$$K|_{z=0} = B; \qquad K|_{z=z} = K(z) \qquad (4.84)$$

получаем выражение для $K(z)$:

$$K(z) = \left\{\frac{1}{\varkappa}\left[\left(\frac{H_п}{H_п - \varkappa z}\right)^{1/2}\left(\varkappa B^{1/2} - \frac{F_V}{V_м}\right) + \frac{F_V}{V_м}\right]\right\}^2 \qquad (4.85)$$

Положив в (4.85) $K(z) = 0$, получаем формулу для расчета длины зоны пластикации $z_{пл}$:

$$z_{пл} = (H_п^{1/2} + H_д^{1/2})(BH_п)^{1/2} V_м F_V^{-1} \qquad (4.86)$$

Путем аналогичных рассуждений можно получить формулы для $K(z)$ и $z_{пл}$ при червяке, зона пластикации которого имеет постоянную глубину H:

$$K(z) = B\,[1 - F_V z/(2HB^{1/2}V_м)]^2 \qquad (4.87)$$

$$z_{пл} = 2HB^{1/2}V_м/F_V \qquad (4.88)$$

4.7.3. Мощность, рассеиваемая в зоне пластикации

Мощность dW, затрачиваемая на смещение элементарного участка стенки цилиндра *8* (см. рис. 4.6) с размерами B и dz, имеет две составляющие dW_1 и dW_2:

$$dW = dW_1 + dW_2 \qquad (4.89)$$

где dW_1 — мощность, затрачиваемая на смещение части элементарного участка шириной B—K относительно неподвижного червяка со скоростью V; dW_2 — мощность, затрачиваемая на смещение части элементарного участка шириной K относительно твердого материала со скоростью $V_{ц/м}$.

Составляющая W_1 полностью аналогична затратам мощности в зоне дозирования и может быть рассчитана по формуле (4.61), в которой вместо полной ширины канала B должна стоять переменная по z ширина части канала B—$K(z)$. Ясно, что последняя величина так же, как и $H=H(z)$, не может быть в (4.61) вынесена за знак интеграла, так что формула (4.61), если пренебречь последним слагаемым (оно вносит в затраты мощности вклад, не превышающий 5—7%), принимает следующий вид:

$$W_1 = \int_0^{W_1} dW_1 = (4V_x^2 + V_z^2)\int_0^{z_{пл}} \frac{B - K(z)}{H(z)}\,\eta(z)\,dz \qquad (4.90)$$

Входящие в (4.90) функции $K(z)$, $H(z)$ и $\eta(z)$ известны и определены выражениями (4.85), (4.87), (4.83), (4.53) и (4.46).

Вычисления по (4.90) возможны с использованием ЭВМ. Однако, если ввести допущение о том, что температура расплава постоянна по длине зоны и равна среднеинтегральному ее значению $\tilde{T}$, определенному выражением (4.47), в котором следует принять $z_д = z_{пл}$, то функция $\eta(z)$ в (4.90) может быть вынесена за знак интеграла и выражение для W_1 после выполнения интегрирования принимает следующий вид:

для червяка с постоянной глубиной канала H

$$W_1 = \frac{V_z^2 + 4V_x^2}{2}\,m_0\left(\frac{V}{H}\right)^{n-1}\exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}}\right)\frac{B^{1/2}z_{пл}^2F_V}{V_м H^2}\left(1 - \frac{F_V z_{пл}}{6HB^{1/2}V_м}\right) \qquad (4.91)$$

для червяка с переменной глубиной канала $H(z)$

$$W_1 = (V_z^2 + 4V_x^2)\,m_0\left(\frac{2V}{H_п + H_д}\right)^{n-1}\exp\left(\frac{E}{R\tilde{T}}\right)F_W \qquad (4.92)$$

где

$$F_W = Bz_{пл}\frac{\ln(H_п/H_д)}{H_п - H_д} - \varkappa^{-3}\left[\left(\varkappa B^{1/2} - \frac{F_V}{V_м}\right)^2\left(\frac{H_п}{H_д} - 1\right) + 4\,\frac{F_V}{V_м}\left(\varkappa B^{1/2} - \frac{F_V}{V_м}\right)\left(\sqrt{\frac{H_п}{H_д}} - 1\right) + \left(\frac{F_V}{V_м}\right)^2\ln\left(\frac{H_п}{H_д}\right)\right]$$

При вычислении входящей в (4.91) и (4.92) средней в области расплава температуры $\tilde{T}$ по формуле (4.47) возникает вопрос: какой принимать температуру области расплава в начале зоны пластикации T_0? Здесь следует иметь в виду, что вытекающий из пленки полимер, образующий начало области расплава, имеет температуру, близкую к температуре цилиндра. По этой причине возможно допущение $T_0 \approx T_ц$ при расчете по (4.46) функции $T(z)$ и по (4.47) величины $\tilde{T}$ для зоны пластикации.

Бесконечно малая мощность dW_2, затрачиваемая на смещение части элементарного участка T стенки цилиндра шириной K и длиной dz (см. рис. 4.6) относительно твердого материала со скоростью $V_{ц/м}$, равна

$$dW_2 = V_{ц/м}\,dF \qquad (4.93)$$

Сила сопротивления смещению dF определяется выражением

$$dF = \tau K(z)\,dz \qquad (4.94)$$

где $\tau = \eta\dot{\gamma}$.

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ в данном случае составляет

$$\dot{\gamma} = V_{ц/м}/\delta \qquad (4.95)$$

причем, если толщину пленки δ выразить из формул (4.80) и (4.81) и ввести в (4.95), то получим

$$\dot{\gamma} = V_{ц/м}V_x K^{-1/2}(z)/(2F_V) \qquad (4.96)$$

Вводя (4.96) и (4.94), в которых функция $K(z)$ определена формулой (4.85), в (4.93) и выполняя интегрирование по всей длине зоны, получаем выражение W_2 для червяка с переменной глубиной канала $H(z)$:

$$W_2 = \frac{V_{ц/м}^2 V_x}{2F_V\varkappa}\,\eta\left\{2\,\frac{H_п^{1/2}}{\varkappa}\left(\varkappa B^{1/2} - \frac{F_V}{V_м}\right)\left[H_п^{1/2} - (H_п - \varkappa z_{пл})^{1/2}\right] + \frac{F_V}{V_м}\,z_{пл}\right\} \qquad (4.97)$$

Входящая в (4.97) вязкость $\eta(\dot{\gamma}, T)$ в соответствии с принятыми на с. 158 допущениями определена формулой (4.81а).

Если выполнить аналогичные математические операции, приняв функцию $K(z)$ в соответствии с формулой (4.87), то получим выражение W_2 для червяка с постоянной глубиной канала:

$$W_2 = \frac{V^2_{ц/м} V_x V_м}{2F_V^2} BH\eta \left[1 - \left(1 - \frac{F_V}{2HB^{1/2}V_м} z_{пл}\right)^2\right] \qquad (4.97а)$$

Так же, как и в зоне дозирования, в зоне пластикации мощность расходуется и на сдвиг расплава в зазоре между гребнем нарезки и стенкой цилиндра. Эта составляющая мощности рассчитывается по формуле (4.66), в которой вместо $z_д$ следует ввести $z_{пл}$.

4.8. РАБОТА ЗОНЫ ПЛАСТИКАЦИИ В РЕЖИМЕ СКОЛЬЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО СТЕНКАМ КАНАЛА

Движение материала в этом режиме как в зоне пластикации, так и в зоне дозирования присуще большинству высоконаполненных термореактивных композиций на основе олигомерных связующих. а также материалам типа асбесто-каучуковых масс. Особенности этого режима изложены в разд. 4.4.4.

4.8.1. Напорно-расходовая характеристика зоны пластикации

На рис. 4.19 представлена схема рабочих органов пластикатора, участок развертки канала нарезки червяка с выделенным в нем элементом материала, имеющим размеры B, H и dz, и векторная диаграмма движения элементов системы в обращенном движении: червяк *1* условно неподвижен, цилиндр *2* вращается с окружной скоростью $V = \pi DN$ (N — частота вращения червяка), вектор которой перпендикулярен оси червяка u. Материал движется в канале, перемещаясь относительно червяка (скользя по его поверхности) со скоростью $V_м$. Скорость $V_{ц/м}$, как и на рис. 4.11, есть скорость движения поверхности цилиндра относительно материала. Из этой диаграммы очевидны следующие соотношения:

$$V^2_{ц/м} = V^2 + V_м^2 - 2VV_м \cos\varphi$$

$$\cos\alpha = ab/V_{ц/м} = (V\cos\varphi - V_м)/\sqrt{V^2 + V_м^2 - 2VV_м\cos\varphi} \qquad (4.98)$$

Возникающие на поверхности скольжения выделенного элемента касательные напряжения τ параллельны соответствующим скоростям скольжения:

$$\tau_ц \parallel V_{ц/м}; \qquad \tau_{чд} \parallel V_м; \qquad \tau_{чб} \parallel V_м$$

Здесь $\tau_ц$ — напряжение на поверхности контакта материала со стенкой цилиндра; $\tau_{чб}$ и $\tau_{чд}$ — напряжения на поверхностях

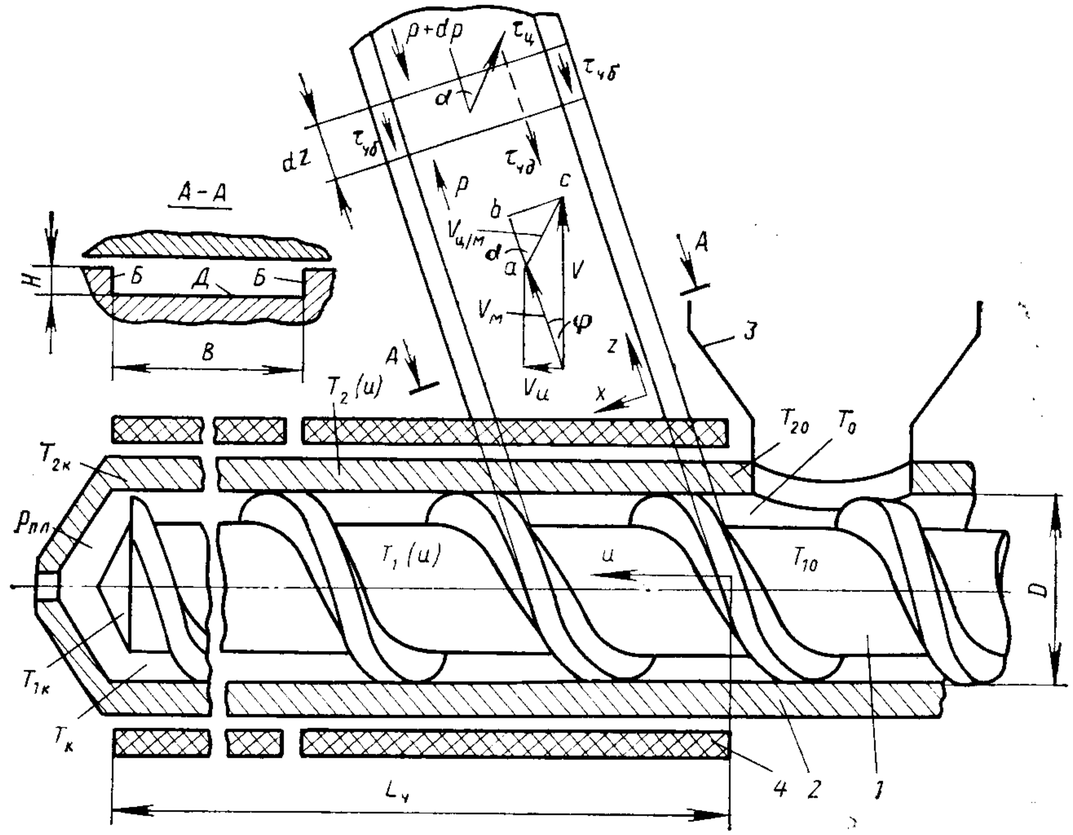


Рис. 4.19. Схема рабочих органов пластикатора:
1 — червяк; *2* — цилиндр; *3* — загрузочная воронка; *4* — электронагреватель.
Пояснения в тексте.

элемента, контактирующих с боковыми стенками и с дном канала червяка, обозначенными соответственно «б» и «д». Эти напряжения связаны с соответствующими скоростями скольжения уравнением пристенного скольжения (1.20), в котором коэффициент сопротивления скольжению k_c зависит от температуры поверхности скольжения T_c (в данном случае — температуры червяка T_1 или цилиндра T_2).

Сумма проекций на ось канала z сил, действующих на выделенный на рис. 4.19 элемент, может быть записана как

$$pBH + \tau_ц Bdz\cos\alpha = 2\tau_{чб}Hdzk_1 + \tau_{чд}Bdzk_2 + (p + dp)\,BH \qquad (4.99)$$

Как видно, левая часть уравнения — сумма движущих сил, правая — сил сопротивления движению. Коэффициенты k_1 и k_2 равны

$$k_1 = 1 - H/D; \qquad k_2 = 1 - 2H/D \qquad (4.100)$$

и учитывают влияние реально имеющей место кривизны канала на размеры площадок элемента.

Вводя выражение (1.20), устанавливающее взаимосвязь между напряжениями и соответствующими им скоростями

скольжения, в уравнение (4.99) и деля каждое его слагаемое на объем элемента $BHdz$, получаем

$$\frac{H}{k_0}\frac{dp}{dz} = V^s_{\text{ц/м}} \cos\alpha \exp\frac{b}{T_2(z)} - V_{\text{м}}{}^s F_Q \exp\frac{b}{T_1(z)} \qquad (4.101)$$

где $F_Q = 2k_1 H/B + k_2 = 2(H/B)(1 - H/D) + (1 - 2H/D)$; $T_1(z)$ и $T_2(z)$ — непостоянные по длине канала температуры червяка и цилиндра; $b = E_c/R$ [см. (1.20)].

Вводя выражения (4.98) в (4.101), деля каждое слагаемое последнего на V^s и выполняя интегрирование, получаем формулу для напорно-расходовой характеристики:

$$N_p = I_2(\cos\varphi - N_Q)(1 + N_Q{}^2 - 2N_Q\cos\varphi)^{(s-1)/2} - I_1 F_Q N_Q{}^s \qquad (4.102)$$

Безразмерные аналоги давления пластикации N_p и производительности N_Q связаны с физическими переменными следующим образом:

$$N_p = p_{\text{пл}} H \sin\varphi/(L_{\text{ч}} k_0 V^s); \qquad N_Q = Q/(BHV) \qquad (4.103)$$

где $p_{\text{пл}}$ — давление пластикации; $L_{\text{ч}}$ — длина рабочей части червяка вдоль оси u; Q — объемная производительность ($Q = V_{\text{м}} BH$).

В уравнение (4.102) входят интегралы

$$I_1 = \frac{1}{L_{\text{ч}}}\int_0^{L_{\text{ч}}} \exp\frac{b}{T_1(u)}\,du; \qquad I_2 = \frac{1}{L_{\text{ч}}}\int_0^{L_{\text{ч}}} \exp\frac{b}{T_2(u)}\,du \qquad (4.104)$$

где $u = z/\sin\varphi$; $L_{\text{ч}} = L_z/\sin\varphi$; $L_{\text{ч}}$, L_z — длина червяка и длина канала червяка соответственно.

Для определения интегралов необходимо знать функции $T_1(u)$ и $T_2(u)$, которые определяются в следующем разделе.

4.8.2. Тепловой режим работы системы червяк — материал — цилиндр

Материал поступает из загрузочной воронки *3* (см. рис. 4.19) в нарезку червяка при температуре T_0. Температуры цилиндра и червяка в начале обогреваемой зоны цилиндра (T_{20} и T_{10} соответственно) на 15—20 К превышают температуру плавления материала.

В промышленных пластикаторах для реактопластов применяются два способа поддержания температуры цилиндра на этом уровне: электрообогрев и жидкостное термостатирование. Первый способ получил большее распространение, поэтому приводимый ниже метод расчета функций $T_1(u)$ и $T_2(u)$ относится именно к этому способу.

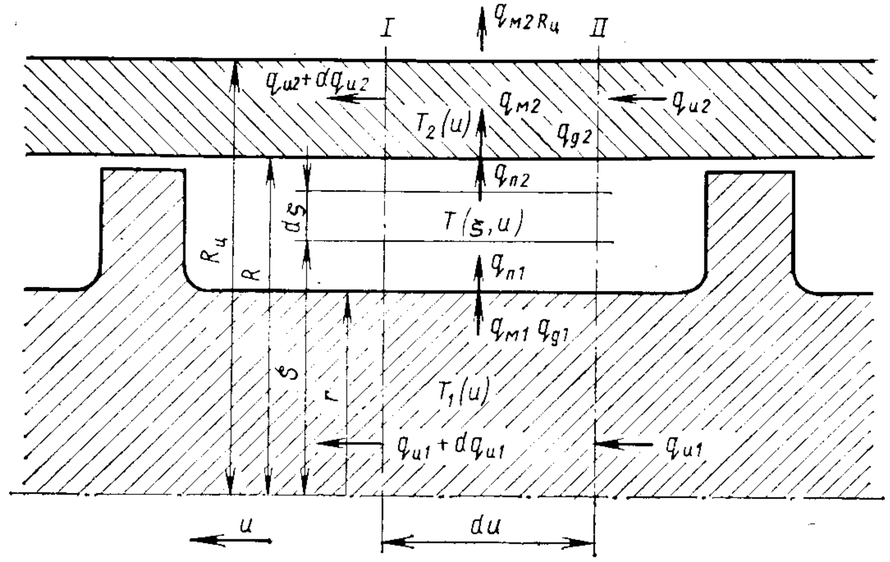


Рис. 4.20. Схема тепловых потоков в системе червяк—материал—цилиндр. Пояснения в тексте.

Электронагреватели *4* (см. рис. 4.19) работают как тепловой источник, если $T_2 < (T_g + 20\ \text{К})$, или как надежный теплоизолятор от окружающей среды, если $T_2 > (T_g + 20\ \text{К})$. Как правило, в установившемся режиме работы имеет место второй вариант, так как количество тепла, генерируемое в канале червяка за счет трения транспортируемого материала о его стенки, оказывается вполне достаточным для нагрева его до требуемой температуры.

Материал движется в канале в направлении оси червяка со скоростью V_u, причем из рис. 4.19 очевидно, что

$$V_u = V_{\text{м}} \sin\varphi \qquad (4.105)$$

Выделим двумя секущими плоскостями *I* и *II*, как это показано на рис. 4.20, участок рассматриваемой системы, имеющий длину в направлении оси червяка u, равную du. На поверхностях скольжения материала по стенкам канала (при координатах $\zeta = R$ и $\zeta = r$) за счет превращения работы трения в тепло имеют место тепловыделения $q_{д2}$ и $q_{д1}$, которые с учетом (1.20) можно выразить как

$$q_{д1} = \tau_{\text{ч}} V_{\text{м}} = V_{\text{м}}{}^{s+1} k_{\text{с}}(T_1); \qquad q_{д2} = \tau_{\text{ц}} V_{\text{ц/м}} = V_{\text{ц/м}}{}^{s+1} k_{\text{с}}(T_2) \qquad (4.106)$$

Это тепло передается как движущемуся в канале материалу, так и телам цилиндра и червяка. За счет этого происходит нагрев материала, а также возникают тепловые потоки вдоль тел цилиндра и червяка q_{u2} и q_{u1} соответственно (см. рис. 4.20).

При составлении тепловых балансных соотношений за положительное направление тепловых потоков примем положительное направление осей ζ и u.

Уравнение теплового баланса для тела червяка на рассматриваемом элементарном участке длиной du имеет следующий вид (см. рис. 4.20):

$$q_{u1}\pi r^2 = (q_{u1} + dq_{u1})\,\pi r^2 + q_{м1}2\pi r du \qquad (4.107)$$

Отсюда

$$q_{м1} = -\frac{r}{2}\,\frac{dq_{u1}}{du} \qquad (4.108)$$

где q_{u1} — тепловой поток в теле червяка вдоль оси его u; $q_{м1}$ — тепловой поток, обусловленный теплообменом червяка с материалом.

Составляя аналогичный баланс для тела цилиндра на участке du, получаем:

$$q_{u2}\pi\,(R_ц^2 - R^2) + q_{м2}\cdot 2\pi R du = \\ = (q_{u2} + dq_{u2})\,\pi\,(R_ц^2 - R^2) + q_{м2R_ц}\cdot 2\pi R_ц du \qquad (4.109)$$

Тепловой поток от цилиндра в окружающую среду $q_{м2Rц}$ практически равен нулю, так как цилиндр имеет теплоизоляцию, поэтому уравнение (4.109) принимает следующий вид:

$$q_{м2} = \frac{R_ц^2 - R^2}{2R}\,\frac{dq_{u2}}{du} \qquad (4.110)$$

В соответствии с законом теплопроводности Фурье выражения для q_{u1} и q_{u2} записываются как

$$q_{u1} = -\lambda_м\,(dT_1/du); \qquad q_{u2} = -\lambda_м\,(dT_2/du) \qquad (4.111)$$

где $\lambda_м$ — теплопроводность металла.

Вводя (4.111) в (4.110) и (4.108), получаем:

$$q_{м1} = \lambda_м\,\frac{r}{2}\,\frac{d^2T_1}{du^2}; \qquad q_{м2} = -\lambda_м\,\frac{R_ц^2 - R^2}{R}\,\frac{d^2T_2}{du^2} \qquad (4.112)$$

На границе раздела при $\zeta = r$ (см. рис. 4.20) тепловой поток $q_{п1}$, направленный от границы раздела в полимер, равен сумме потоков $q_{м1}$, поступающего к границе из металла, и $q_{д1}$, генерирующегося на границе раздела:

$$q_{п1} = q_{м1} + q_{д1} \qquad (4.113)$$

Аналогично, для границы раздела $\zeta = R$ тепловой поток $q_{м2}$, направленный от границы раздела в металл, равен сумме потока, поступающего из полимера $q_{п2}$, и потока генерирующегося на границе раздела $q_{д2}$:

$$q_{м2} = q_{п2} + q_{д2} \qquad (4.114)$$

Тепловые потоки в полимере $q_{п1}$ и $q_{п2}$ в соответствии с законом теплопроводности Фурье записываются как

$$q_{п1} = -\lambda\,\frac{dT}{d\zeta}\Big|_{\zeta=r}; \qquad q_{п2} = -\lambda\,\frac{dT}{d\zeta}\Big|_{\zeta=R} \qquad (4.115)$$

где λ — теплопроводность полимера.

Выражения для входящих в (4.115) производных могут быть найдены из решения уравнения теплопроводности для полимера, которое имеет следующий вид:

$$\rho c V_u\,\frac{\partial T}{\partial u} = \lambda\,\frac{\partial^2 T}{d\zeta^2} \qquad (4.116)$$

где ρ — плотность полимера; c — теплоемкость полимера; $V_u = V_м = \sin\varphi$ — скорость движения материала в направлении оси червяка u.

Граничные условия этого уравнения таковы:

$$T\,|_{\zeta=r} = T_1; \qquad T|_{\zeta=R} = T_2; \qquad T\,|_{u=0} = T_0 \qquad (4.117)$$

Введем следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\bar{\zeta} = \frac{\zeta - r}{R - r}; \qquad \bar{u} = \frac{u}{L_ч}; \qquad F_ч = \frac{aL_ч}{(R-r)^2 V\sin\varphi}; \qquad a = \frac{\lambda}{\rho c} \qquad (4.118)$$

где a — коэффициент температуропроводности полимера.

Тогда уравнение (4.116) и его граничные условия (4.117) запишутся в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{d\bar{u}} = \frac{F_ч}{N_Q}\,\frac{\partial^2 T}{\partial\bar{\zeta}^2}; \qquad T\,\Big|_{\bar{\zeta}=0} = T_1; \qquad T\,\Big|_{\bar{\zeta}=1} = T_2; \qquad T\,\Big|_{\bar{u}=0} = T_0 \qquad (4.119)$$

Приближенное решение уравнения (4.119) имеет вид:

$$T(\bar{\zeta}, \bar{u}) = T_2 + (1-\bar{\zeta})\,\{(T_1 - T_2) - 4\bar{\zeta}\,(T_{20} - T_0)\exp[-12\,(F_ч/N_Q)\,\bar{u}]\} \qquad (4.120)$$

Нетрудно убедиться, что решение (4.120) полностью удовлетворяет граничным условиям (4.119), однако самому уравнению (4.119) удовлетворяет лишь приближенно.

Получая при известной теперь функции $T(\bar{u}, \bar{\xi})$ выражения (4.115) для $q_{п1}$ и $q_{п2}$ и вводя их, а также выражения (4.112) для $q_{м1}$ и $q_{м2}$ и выражения (4.106) для $q_{д1}$ и $q_{д2}$ в уравнения теплового баланса (4.113) и (4.114), приходим к двум дифференциальным уравнениям относительно двух неизвестных функций $T_1(\bar{u})$ и $T_2(\bar{u})$:

$$-F_1\,\frac{d^2T_1}{d\bar{u}^2} = F_3 N_Q^{s+1}\exp\left(\frac{b}{T_1}\right) - \\ - 4\,(T_{20} - T_0)\exp\left(-12\,\frac{F_ч}{N_Q}\,\bar{u}\right) - (T_1 - T_2) \qquad (4.121)$$

$$-F_2\,\frac{d^2T_2}{d\bar{u}^2} = F_3\,(1 + N_Q^2 - 2N_Q\cos\varphi)^{\frac{s+1}{2}}\exp\left(\frac{b}{T_2}\right) - \\ - 4\,(T_{20} - T_0)\exp\left(-12\,\frac{F_ч}{N_Q}\,\bar{u}\right) + (T_1 - T_2) \qquad (4.122)$$

где

$$F_1 = \frac{\lambda_м\,(R-r)\,r}{2\lambda L_ч^2}; \qquad F_2 = \frac{\lambda_м\,(R-r)\,(R_ц^2 - R^2)}{2\lambda R L_ч^2}; \qquad F_3 = \frac{V^{s+1}}{\lambda}\,k_0\,(R-r)$$

Определяя граничные условия уравнений (4.121) и (4.122), отметим, что теплоотдачей от сопловой части цилиндра в атмосферу можно пренебречь: $q_{u2}\big|_{u=L_ч}=0$ (см. рис. 4.19). Можно пренебречь также теплообменом между торцевой передней поверхностью червяка и находящимся перед ним материалом: $q_{u1}\big|_{u=L_ч}=0$.

При учете этих допущений граничные условия уравнений (4.121) и (4.122) принимают следующий вид:

$$\text{а)}\ T_2\big|_{\bar{u}=0}=T_{20};\qquad \text{б)}\ T_1\big|_{\bar{u}=0}=T_{10};$$

$$\text{в)}\ \frac{dT_1}{d\bar{u}}\bigg|_{\bar{u}=1}=0;\qquad \text{г)}\ \frac{dT_2}{d\bar{u}}\bigg|_{\bar{u}=0}=0 \qquad (4.123)$$

Приближенные решения уравнений (4.121) и (4.122) примем в следующей форме:

$$T_1(\bar{u})=T_{10}+2(T_{1к}-T_{10})(\bar{u}-\bar{u}^2/2) \qquad (4.124)$$

$$T_2(\bar{u})=T_{20}+2(T_{2к}-T_{20})(\bar{u}-\bar{u}^2/2) \qquad (4.125)$$

Здесь $T_{1к}$ и $T_{2к}$ — температуры червяка и цилиндра соответственно у выхода из винтового канала, т. е. при $\bar{u}=1$ (см. рис. 4.19); эти величины пока неизвестны. Как видно, решения (4.124) и (4.125) удовлетворяют граничным условиям (4.123).

Найдем значения $T_{1к}$ и $T_{2к}$, при которых решения (4.124) и (4.125) удовлетворяют уравнениям (4.121) и (4.122) приближенно, т. е. на всем интервале интегрирования $0\leqslant\bar{u}\leqslant1$. Для этого проинтегрируем на всем указанном интервале, например, уравнение (4.121):

$$-F_1\left(\frac{dT_1}{d\bar{u}}\bigg|_{\bar{u}=1}-\frac{dT_1}{d\bar{u}}\bigg|_{\bar{u}=0}\right)=F_3N_Q^{s+1}\int_0^1\exp\left(\frac{b}{T_1}\right)d\bar{u}-$$

$$-4(T_{20}-T_0)\int_0^1\exp\left(-12\frac{F_ч}{N_Q}\bar{u}\right)d\bar{u}-\int_0^1(T_1-T_2)\,d\bar{u} \qquad (4.126)$$

Выполняя интегрирование, во-первых, будем иметь в виду, что с учетом граничного условия (4.123в) левая часть уравнения принимает вид:

$$F_1\left(\frac{dT_1}{d\bar{u}}\bigg|_{\bar{u}=1}-\frac{dT_1}{d\bar{u}}\bigg|_{\bar{u}=0}\right)=F_1[0-2(T_{1к}-T_0)] \qquad (4.126а)$$

Во-вторых, введем следующее приближение:

$$\int_0^1\exp[b/T_1(\bar{u})]\,d\bar{u}\approx\exp(b/\tilde{T}_1),\quad\text{где}\quad\tilde{T}_1=\int_0^1T_1(\bar{u})\,d\bar{u} \qquad (4.126б)$$

В-третьих, введем в (4.126) решение (4.124). В результате после интегрирования и приведения подобных членов получаем

$$T_{1к}=\frac{1}{2}\left\{\frac{3b}{\ln\dfrac{4(T_{20}-T_0)N_Q\cdot12F_ч^{-1}[1-\exp(-12F_чN_Q^{-1})]+F_4+F_5}{F_3N_Q^{s+1}}}-T_{10}\right\} \qquad (4.127)$$

Выполняя аналогичные же операции с уравнением (4.122), получаем

$$T_{2к}=\frac{1}{2}\left\{\frac{3b}{\ln\dfrac{4(T_{20}-T_0)N_Q\cdot12F_ч^{-1}[1-\exp(-12F_чN_Q^{-1})]+F_ч-F_5}{F_3(1+N_Q^2-2N_Q\cos\varphi)^{(s+1)/2}}}-T_{20}\right\} \qquad (4.128)$$

В уравнениях (4.127) и (4.128)

$$F_4=2F_1(T_{1к}-T_{10});\qquad F_5=1/3[(T_{10}-T_{20})+2(T_{1к}-T_{2к})];$$
$$F_6=2F_2(T_{2к}-T_{20})$$

Выражения (4.127) и (4.128) неразрешимы относительно неизвестных $T_{1к}$ и $T_{2к}$, поэтому поиск значений $T_{1к}$ и $T_{2к}$ может выполняться по методу последовательных приближений, причем при определении $T_{1к}$ и $T_{2к}$ в первом приближении может быть использовано следующее допущение:

$$F_4=F_5=F_6=0$$

Второе приближение оказывается достаточным для получения значений $T_{1к}$ и $T_{2к}$ с точностью ±1 К.

Таким образом, задача об определении производительности сводится к совместному решению трех уравнений — (4.127), (4.128) и (4.102) — относительно трех неизвестных — $T_{1к}$, $T_{2к}$ и N_Q. Вычислив N_Q, по формуле (4.103) можем определить производительность Q. Следует заметить, что входящие в (4.102) I_1 и I_2 [см. (4.104)] при известных теперь функциях $T_1(\bar{u})$ [см. (4.124)] и $T_2(\bar{u})$ [см. (4.125)] могут быть представлены в явном виде и с учетом приближения (4.126б) принимают следующие выражения:

$$I_1=\exp[3b/(T_{10}+2T_{1к})];\qquad I_2=\exp[3b/(T_{20}+2T_{2к})] \qquad (4.129)$$

Совместное решение уравнений (4.127), (4.128) и (4.102) возможно лишь на ЭВМ методом последовательных приближений по схеме: а) принимаем в исходном приближении $N_Q=\cos\varphi$; б) вводим N_Q в (4.127) и (4.128) и вычисляем $T_{1к}$ и $T_{2к}$ как указано выше; в) вводим $T_{1к}$ и $T_{2к}$ в (4.129) и по (4.102) вычисляем N_Q в первом приближении; г) во втором и последующих приближениях повторяем операции «б» и «в».

Приближения выполняются до совпадения последнего и предыдущего значений N_Q с заданной точностью.

Расчетную процедуру можно упростить, если приближенно считать, что скорости скольжения материала по червяку и цилиндру равны: $V_м = V_{ц/м}$. Этому соответствует значение $N_Q = (2\cos\varphi)^{-1}$; вводя его в (4.127) и (4.128), вычисляем $T_{1к}$ и $T_{2к}$, после чего по (4.129) и (4.102) определяем приближенное значение N_Q.

4.8.3. Мощность, рассеиваемая в зоне пластикации

Мощность привода червяка во вращение превращается в тепловые потоки $q_{д1}$ и $q_{д2}$ на поверхностях трения материала о стенки винтового канала, образованного нарезкой червяка и рабочей поверхностью цилиндра, а также затрачивается на продавливание материала по каналу, сопровождаемое преодолением давления на выходе из канала червяка $p_{пл}$ (давления пластикации). В соответствии с этим выражение для мощности привода червяка W имеет вид

$$W = \int_0^{L_ч} q_2(u) \cdot 2\pi R du + \int_0^{L_ч} q_1(u) \cdot 2\pi r\,(1 + 2H/B)\,du + Qp_{пл} \qquad (4.130)$$

Каждое слагаемое в (4.130) отвечает следующим затратам мощности: а) на трение о стенку канала, образованную цилиндром; б) на трение о стенки канала, образованные нарезкой червяка [сомножитель $(1+2\,H/B)$ учитывает тот факт, что трение имеет место не только на дне канала $Д$, но и на боковых его стенках $Б$ (см. рис. 4.20)]; в) на продавливание материала по каналу с расходом Q с преодолением давления на выходе из канала $p_{пл}$.

Вводя известные выражения (4.106) и (1.20) для диссипативных тепловых потоков $q_{д1}$ и $q_{д2}$ в формулу мощности (4.130) и выполняя затем интегрирование с учетом приближения (4.126б) и известных функций $T_1(u)$ [см. (4.124)] и $T_2(u)$ [см. (4.125)], получаем следующее выражение для расчета мощности:

$$N_W = (1 + N_Q^2 - 2N_Q\cos\varphi)^{(s+1)/2} \exp[3b/(T_{20} + 2T_{2к})] + \\ + F_W N_Q^{s+1} \exp[3b/(T_{10} + 2T_{1к})] + N_Q N_p \qquad (4.131)$$

где безразмерные аналог мощности N_W и параметр F_W могут быть выражены как

$$N_W = W(2\pi R V^{s+1} k_0 L_ч)^{-1}$$
$$F_W = (r/R)(1 + 2H/B) \qquad (4.132)$$

4.9. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МАШИН В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Для пластикаторов, работающих в составе литьевых машин и экструзионно-выдувных агрегатов, а также обслуживающих прессы для формования изделий из реактопластов и резиновых

смесей, характерен циклический режим работы. Цикл состоит из двух операций: вращение червяка (пластикация) и выстой.

В течение первой операции червяк, вращаясь, подготавливает дозу расплава для последующего впрыска.

При литье под давлением или прессовании эта доза накапливается непосредственно в пластикационном цилиндре перед червяком, который, вращаясь, смещается в осевом направлении к загрузочному отверстию и тем самым высвобождает для дозы расплава необходимый объем. После того как доза накоплена, она осевым движением червяка, который при этом не вращается, впрыскивается в форму. Если червяк при вращении не смещается в осевом направлении, то расплав из цилиндра выдавливается в промежуточную емкость, откуда по достижении требуемого объема дозы передавливается в форму.

В экструзионно-выдувных агрегатах в течение первой операции червяк, вращаясь, выдавливает расплав из головки в виде трубчатой заготовки, которая после ее выдачи захватывается полуформами.

Операция пластикации, как правило, совмещена по времени с операциями формования дозы расплава, полученной в предыдущем цикле. Длительность операции формования превышает длительность пластикации. По этой причине в цикле работы пластикатора появляется вторая операция — выстой.

Основные параметры, характеризующие циклический режим и степень отличия его от стационарного, — это время цикла $t_ц$ и доля времени пластикации $t_{пл}$ в общем времени цикла, оцениваемая отношением $t_{пл}/t_ц$. Чем ближе это отношение к единице, тем меньше отличие циклического режима от стационарного.

В стационарном режиме работы пластикатора процессы траспортирования материала в канале червяка, теплогенерации за счет работы деформирования материала и трения его о стенки канала, а также теплообмена материала с телами червяка и цилиндра протекают непрерывно. При циклическом режиме только последний из отмеченных процессов происходит в течение всего цикла. Транспортирование и теплогенерация во время выстоя отсутствуют. Ниже перечислены особенности циклического режима, которые этим обусловлены.

Периодическое возникновение диссипативного теплового источника приводит к тому, что прогрев материала осуществляется в нестационарном режиме; температура поступающего в дозу расплава оказывается непостоянной. Температурная неоднородность дозы по этой причине может достигать 15—25 К, что является одним из существенных недостатков циклического режима.

Так как диссипативные тепловыделения имеют место в течение части цикла, то расплав, получая меньшее, чем в стационарном режиме, количество тепла, выходит из пластикатора с более низкой температурой.

Периодические выстои приводят к возрастанию времени пребывания материала в канале по сравнению со стационарным

режимом; за счет этого прогрев материала может быть осуществлен в канале меньшей длины.

Расчеты размеров зон, температуры материала, производительности и мощности привода червяка для пластикаторов, работающих в циклическом режиме, можно выполнять приближенно (и с некоторыми изменениями) по выше приведенным формулам для стационарного режима, если ввести следующие упрощающие предположения.

Во-первых, во всех тепловых расчетах будем считать, что материал движется в канале не в пульсирующем режиме с периодическими остановками, а непрерывно, но со скоростью вдоль канала, равной $V_м(t_{пл}/t_ц)$, где $V_м$ — фактическая скорость движения материала вдоль оси канала z.

Во-вторых, во всех тепловых расчетах примем условно, что диссипативные тепловыделения не возникают периодически, а действуют непрерывно, однако интенсивность их $q_д(t_{пл}/t_ц)$ меньше, чем фактическая $q_д$.

В соответствии с этим приведенные выше расчеты должны претерпеть следующие изменения.

В уравнении теплового баланса для расплава в зоне дозирования (4.45) первое и второе слагаемые, соответствующие конвективному теплопереносу вдоль канала и диссипативным тепловыделениям соответственно, должны быть домножены на отношение $t_{пл}/t_ц$. По этой причине в выражения для параметров A и G в (4.46) должен быть введен сомножитель $t_{пл}/t_ц$. Параметр G, входя в формулу (4.55) для F_z, при расчете производительности Q и мощности W_1 также должен сохранять этот сомножитель.

Для зоны пластикации при пленочном режиме плавления уравнение теплового баланса в области пленки (4.68) содержит второе слагаемое, соответствующее диссипативному тепловому потоку. Это слагаемое должно быть домножено на отношение $t_{пл}/t_ц$; по этой причине в выражение (4.81) для параметра F_V также должно быть введено это отношение в качестве сомножителя перед вязкостью η. В уравнении материального баланса (4.82) скорость $V_м$ должна быть домножена на $t_{пл}/t_ц$; в соответствии с этим множитель $t_{пл}/t_ц$ перед $V_м$ появится в формулах (4.85), (4.86), (4.87), (4.88), (4.91), (4.92), (4.97).

Для процесса пластикации в режиме скольжения по стенкам канала диссипативные потоки $q_{д1}$ и $q_{д2}$ [см. (4.106)] должны иметь сомножитель $t_{пл}/t_ц$; по этой причине он появляется в выражении для параметра F_3 в (4.122). В уравнении теплового баланса для полимера (4.116) при скорости осевого смещения материала V_u должен быть множитель $t_{пл}/t_ц$; по этой причине выражение (4.118) для параметра $F_ч$ должно быть домножено на отношение $t_ц/t_{пл}$.

4.10. СМЕШЕНИЕ РАСПЛАВА В КАНАЛЕ ЧЕРВЯКА

В экструдерах часто параллельно с пластикацией материала выполняется операция смешения его с какими-либо добавками. Например, при одном из способов окрашивания термопластов в бункер экструдера загружают гранулы бесцветного материала с добавкой гранул этого же материала, но окрашенного, содержащего значительное количество красителя. При транспортировании расплава в канале червяка происходит смешение этих двух видов материалов.

Процесс смешения разнородных материалов в жидком состоянии заключается в уменьшении толщины слоев компонентов, составляющих смесь. В канале червяка смешение осуществляется за счет развития в материале сдвиговых деформаций. Механизм смешения рассмотрим на следующем примере (рис. 4.21). Пусть в исходном состоянии смесь состоит из чередующихся слоев белого и черного материалов с толщиной слоев r_0 (рис. 4.21, $а$). В результате смещения верхней границы на величину L (рис. 4.21, $б$) в материале развивается деформация сдвига γ, равная

$$\gamma = L/H = \operatorname{tg}\alpha \qquad (4.133)$$

Толщина слоев уменьшается при этом до величины r. Из треугольника abc очевидно соотношение

$$\operatorname{tg}\alpha = bc/(ac) = \sqrt{r_0^2 - r^2}/r = \gamma \qquad (4.134)$$

устанавливающее взаимосвязь между текущим значением толщины слоев r и деформацией сдвига γ. Иначе это соотношение можно представить так:

$$\bar{r} \equiv r_0/r = \sqrt{1+\gamma^2}, \quad \text{или} \quad (\text{при } \gamma \gg 1)\ \bar{r} \approx \eta \qquad (4.135)$$

Величина $\bar{r}$ определяет, во сколько раз уменьшилась при смешении толщина слоев по сравнению с исходной, и поэтому может служить количественной мерой степени смешения. Из (4.135) видно также, что при больших деформациях величина сдвиговой деформации γ практически равна $\bar{r}$, поэтому она также может быть использована для количественной оценки степени смешения.

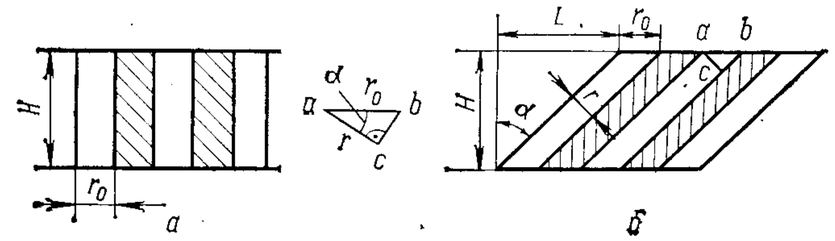


Рис. 4.21. Изменение толщины полос вследствие деформации сдвига:
***а* — до деформации; *б* — после деформации.**

Деформация γ, накопленная в материале, пропорциональна интенсивности деформирования (скорости сдвига $\dot{\gamma}=dv/dn$, где n — направление, нормальное вектору скорости v) и времени деформирования t:

$$\gamma=\dot{\gamma}t \qquad (4.136)$$

Материал в канале червяка включается в процесс смешения с момента перехода его в вязкотекучее состояние. Достигнутая степень смешения в материале на выходе из канала, в соответствии с (4.136), опрделяется временем пребывания расплава в канале и скоростью сдвига в нем.

Смешение в одночервячных машинах не обеспечивает одинакового значения степени смешения для всех материальных частиц деформируемого расплава. Неоднородность степени смешения обусловлена прежде всего тем, что время пребывания в канале элементарных порций расплава различно вследствие прилипания расплава к стенкам канала. Частицы, движущиеся по траекториям, расположенным вблизи стенок, пребывают в канале значительно дольше, чем частицы серединной области канала. При этом и скорость сдвига в пристенных областях, как правило, максимальна. В результате распределение степени смешения в поперечном сечении канала на выходе из него имеет вид, показанный на рис. 4.22. Основная доля потока, выходящего из канала (интервал по относительной высоте сечения — от 0,2 до 0,9), имеет практически одинаковую степень смешения, и только краевые небольшие области характеризуются гораздо большей ее величиной.

Это распределение получено для участка канала, заполненного расплавом, что соответствует при пластикации термопластов лишь зоне дозирования. Реально же материал включается в процесс смешения еще в зоне пластикации. Каждая элементарная частица, переходя в расплав, попадает прежде всего в область пленки *2* (см. рис. 4.6), где подвергается сдвиговому деформированию в течение времени пребывания в этой области. Это время пребывания различно для различных частиц по двум причинам.

Во-первых, ширина твердой области K (см. рис. 4.6) и, следовательно, путь частиц в области пленки различны по длине зоны. Во-вторых, частицы могут попадать из твердой области (см. сечение A—A) в пленку как у стенки *5*, так и в непосредственной близости к области *4*. Из-за сильного различия времен пребы-

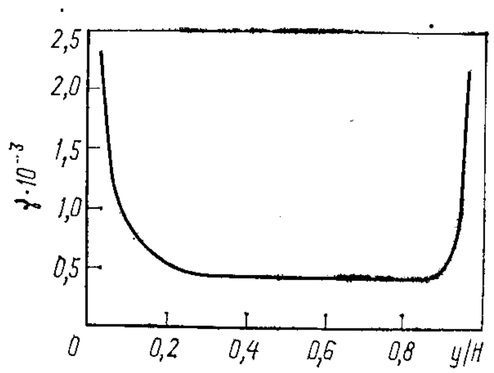
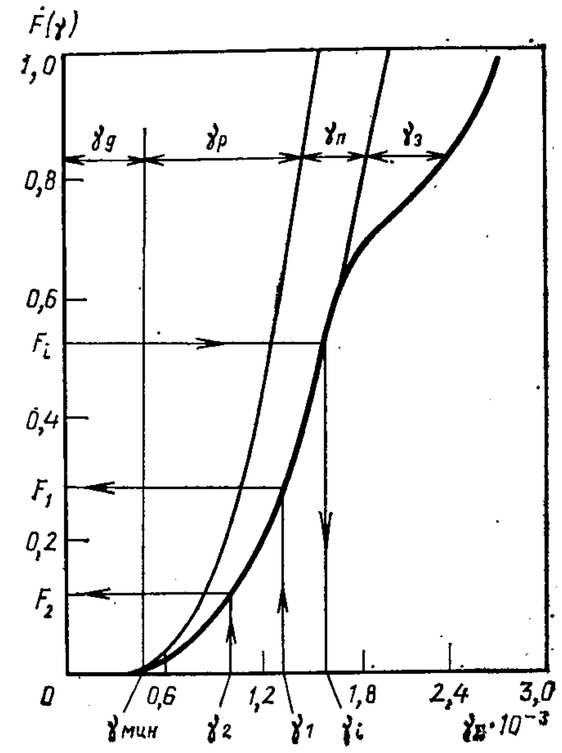


Рис. 4.22. Распределение степени смешения расплава (оцененной величиной γ) по относительной высоте канала y/H.

Рис. 4.23. Интегральная функция распределения степени смещения γ_Σ расплава термопласта на выходе из пластицирующего экструдера.



вания в пленке выходящий из нее и попадающий в область *4* расплав характеризуется значительной неоднородностью степени смешения.

Смешение продолжается и в области *4* зоны пластикации. Частицы, попавшие из пленки в область *4* в начале зоны пластикации, пребывают в этой области наиболее долго. Время пребывания в этой области частиц, поступивших в нее в конце зоны пластикации, практически равно нулю. Очевидно, что деформация γ, накопленная расплавом за время пребывания в области *4*, чрезвычайно неоднородна.

Деформация элементарного объема материала на выходе из канала γ_Σ есть сумма деформаций, приобретенных им за время пребывания в пленке ($\gamma_п$), в области *4* ($\gamma_р$) и в зоне дозирования ($\gamma_д$). Кроме того, часть расплава, попадая в зазор между гребнем нарезки червяка и стенкой цилиндра, подвергается деформированию и там, в результате чего приобретает дополнительную деформацию $\gamma_з$. На рис. 4.23 приведена функция распределения степени смешения γ_Σ расплава в потоке на выходе из пластикатора. Смысл этой функции таков: некое произвольно взятое значение функции F_i есть доля от общего расхода расплава на выходе, имеющая частицы с деформацией от $\gamma_{мин}$ до γ_i. Можно также оценивать, какую долю расхода (F_1—F_2) составляют материальные частицы с деформациями в интервале от γ_1 до γ_2. Из рис. 4.23 можно также судить об относительном вкладе в γ_Σ ее составляющих $\gamma_п$, $\gamma_р$, $\gamma_д$ и $\gamma_з$.

Вид функции распределения деформации γ_Σ в подготовленном расплаве позволяет сделать ряд заключений о работе одночервячных пластикаторов в качестве смесителей.

Во-первых, зона пластикации вносит существенный вклад в общее смесительное воздействие.

Во-вторых, степень смешения расплава чрезвычайно неоднородна. Несмотря на то, что более половины расплава характеризуется значением $\gamma>1400$, расплав можно считать пригодным к формованию лишь в том случае, если $\gamma=\gamma_{мин}\approx 500$ удовлетворяет требованиям к качеству распределения компонентов в смеси. К тому же нужно еще иметь в виду, что функция рас-

пределения построена в предположении, что пленочный режим плавления без разрушения области твердого полимера сохраняется вплоть до полного ее исчезновения. На самом же деле, как отмечалось, эта область в конце зоны пластикации начинает разрушаться. Отдельные крупные куски ее циркуляционным потоком расплава разносятся по всему сечению. Скорость плавления их резко замедляется, вследствие чего они могут проникать достаточно далеко в зону дозирования, а иногда появляются и на выходе из канала. Понятно, что материал этих кусков включается в процесс смешения только с середины (или даже в конце) зоны дозирования, поэтому на выходе из канала встречаются значения γ, гораздо меньшие, чем $\gamma_{мин}=\gamma_{д}$.

Значительная неоднородность степени смешения расплава и возможность «проскока» непромешанных областей — основной недостаток одночервячных пластикаторов термопластов, используемых также и для их смешения. В связи с этим часто концевые части червяков выполняют в виде смесительных элементов различной конструкции. При этом преследуются цели: во-первых, предотвратить «проскок», во-вторых, повысить значение $\gamma_{мин}$, улучшив тем самым качество смешения.

Несмотря на усовершенствование конструкции червяков, одночервячные машины применяются в качестве смесителей только в тех случаях, когда к качеству смешения не предъявляется жестких требований или когда процесс смешения не имеет специфических особенностей, осложняющих его проведение. Типичный пример возможного применения — окрашивание добавкой гранул с концентратом красителя. В тех случаях, когда требуется обеспечить степень смешения практически на молекулярном уровне при соблюдении высокой однородности степени смешения (например, введение стабилизаторов, пластификаторов), применяют, как правило, двух- и многочервячные машины, машины с осциллирующим червяком, двухстадийные червячные смесители и др.

Трудности при смешении возникают, когда низковязкие жидкости смешиваются с большим количеством наполнителя. Типичный пример реактопласты; их расплавы, как отмечалось выше, движутся в канале червяка в режиме скольжения, практически не деформируясь. Смешение в канале в этом случае без принятия дополнительных мер отсутствует. Другой пример — приготовление резиновых смесей. Значительное (более чем в 10 раз) изменение вязкости каучука при смешении и необходимость разрушения (диспергирования) достаточно прочных агломератов вводимого в смесь технического углерода — основные особенности процесса. Трудности смешения, вызванные этими особенностями, могут быть преодолены лишь при использовании червяков узкоспециальной конструкции.

4.11. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И ДЕТАЛИ ЧЕРВЯЧНЫХ МАШИН

4.11.1. Червяки

Червяки состоят, как правило, из двух частей: рабочей (нарезной) и хвостовой. Конфигурация *рабочей (нарезной) части* непосредственно зависит от технологических операций, выполняемых на червячной машине, и должна обеспечивать оптимальные условия протекания в канале нарезки процессов, совокупность которых составляет сущность данной технологической операции.

Конструкция хвостовой части *(хвостовика)* должна обеспечивать передачу крутящего момента на червяк; передачу осевого усилия с червяка на упорный подшипник; подачу и отвод термостатирующей жидкости, циркулирующей в центральном осевом отверстии червяка; она также должна предотвращать попадание обрабатываемого материала из зоны питания канала червяка в полость упорного подшипника.

Червяки для термопластов. Пластикация термопластов в пленочном режиме обеспечивает наибольшую интенсивность плавления и, следовательно, завершение перевода в вязкотекучее состояние на относительно малой длине червяка. Нагрев и плавление в этом режиме осуществляются преимущественно за счет диссипативных тепловыделений в области пленки *2* (см. рис. 4.6), причем интенсивность тепловыделений пропорциональна квадрату скорости сдвига $\dot{\gamma}$ в этой области [см. формулу (4.39)]. Толщина пленки δ в десятки раз меньше глубины канала H, поэтому величина $\dot{\gamma}=V_{ц/м}/\delta$ относительно велика. Если же твердая область разрушается на крупные агломераты и смешивается с областью расплава *4*, то интенсивность их плавления резко снижается, так как скорость сдвига $\dot{\gamma}=V/H$ и, следовательно, интенсивность тепловыделений в этой области намного ниже. По этой причине традиционная конструкция рабочей части червяков преследует цель в максимальной степени сохранить пленочный режим пластикации.

Для сохранения пленочного режима необходимо соблюдение следующих условий (см. рис. 4.6, сечение *А—А*). Во-первых, монолитность (отсутствие разрушения) твердой области *1*, что возможно при достаточной ее прочности, достигаемой за счет слипания размягчающихся при нагреве гранул. Во-вторых, постоянный поджим области *1* к стенке цилиндра *8*, т. е. обеспечение подачи материала твердой области вверх к поверхности плавления (границе раздела областей *1* и *2*).

Если второе условие не будет соблюдаться, т. е. подачи вверх не будет, то из-за плавления твердой области *1* толщина пленки *2* начнет возрастать, и пленочный режим выродится. Таким образом, материал области *1* должен быть достаточно деформативным, чтобы давлением со стороны расплава, отжи-

маясь влево, постоянно изменять свою конфигурацию и подниматься к стенке цилиндра *8*. К тому же и вязкость расплава в области *4* должна быть большей, чтобы оказываемое на область *1* давление было достаточным для ее деформирования.

Из рассмотренного ясно, что пленочный режим плавления будет сохраняться у материалов, имеющих широкий температурный интервал высокоэластического состояния при повышенной деформативности и повышенной когезии (слипаемости) в этом состоянии, а также обладающих высокой вязкостью в вязкотекучем состоянии. Лишь очень немногие материалы отвечают этим требованиям (например, сильно пластифицированный поливинилхлорид). По этой причине стремятся к тому чтобы сама конструкция способствовала соблюдению условий сохранения пленочного режима. Например, стремятся к тому, чтобы область *1*, оплавляющаяся сверху и уменьшающаяся по этой причине по высоте, постоянно поджималась к цилиндру *8;* в связи с этим глубину канала H в зоне пластикации делают постоянно уменьшающейся. Таким образом, уменьшение глубины канала служит не только для уплотнения рыхлого материала области *1* с целью удаления из него воздуха, но и для сохранения пленочного режима.

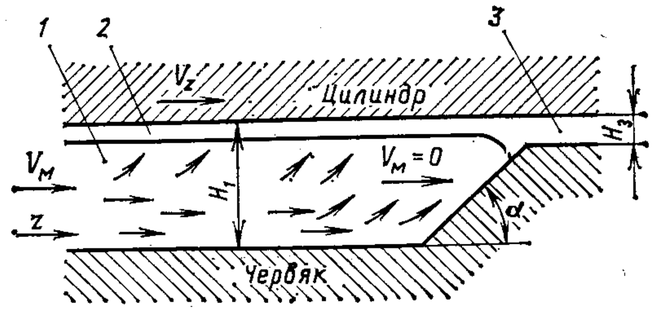
Из сказанного ясно, что нужно, чтобы интенсивность уменьшения глубины канала соответствовала интенсивности оплавления твердой области сверху. Однако обеспечить строгое соответствие этих факторов практически невозможно. По этой причине возможен чрезмерный поджим области *1* к стенке *8*. Чрезмерный поджим приводит к резкому уменьшению толщины пленки, тепловыделения сильно возрастают, вследствие чего термопласты с низкой термостабильностью могут подвергаться частичной термодеструкции. Во избежание этого червяки для термопластов с низкой термостабильностью и высокой вязкостью в состоянии расплава выполняют с очень монотонно, плавно уменьшающейся глубиной канала, часто — с глубиной канала уменьшающейся вплоть до конца червяка.

Высококристаллические материалы (например, полиамиды, некоторые марки полиэтиленов) не имеют широкого температурного интервала размягчения, поэтому их гранулы при нагреве остаются жесткими и практически не слипаются вплоть до температуры плавления. Твердая область *1* этих материалов (см. рис. 4.6) легко разрушается, как бы разрывается во многих поперечных сечениях из-за силового воздействия на нее со стороны стенки цилиндра, имеющей продольную составляющую скорости V_z. Действительно, скорость движения твердой области $V_м$ меньше, чем V_z, и стенка цилиндра стремится как бы растянуть область *1*, что приводит к разрыхлению ее и множественным разрывам.

Это растяжение можно устранить, если на пути движения твердой области *1* установить в канале червяка неподвижную преграду, например, как это показано на продольном сечении

Рис. 4.24. Продольное сечение канала червяка:

1 — область твердого полимера в зоне пластикации; *2* — область пленки расплава в зоне пластикации; *3* — канал зоны дозирования.



канала на рис. 4.24. Если канал с постоянной глубиной H_1 имеет участок с резким уменьшением глубины до H_3, твердая область встречает на своем пути эту преграду, и скорость ее вдоль канала у преграды становится равной нулю. Поступающий в канал твердый полимер поджимает твердую область и разрушение ее вследствие растяжения отсутствует. Под воздействием сжатия со стороны входа в канал неслипающиеся гранулы перераспределяются и поступают к стенке цилиндра, где плавятся, а расплав уносится стенкой цилиндра в зону канала за преградой, т. е. в зону дозирования.

Организованная таким образом зона пластикации успешно работает, если стенка преграды расположена достаточно круто по отношению к оси канала z (т. е. если угол α достаточно велик). В противном случае твердая область начинает скользить по стенке преграды, закупоривая вход в зону дозирования. Может даже произойти полное закупоривание канала, если твердая область, разрушившись у преграды, займет все сечение канала. Разрушение и закупоривание могут также произойти, если перепад высот H_1 и H_3 недостаточно велик; этого не происходит, если $H_1/H_3 \approx 2{,}5 \div 3$. Червяки с таким профилем высоты канала работают удовлетворительно, если переход от H_1 к H_3 осуществлен на длине червяка, не превышающей $(1{,}5 \div 2{,}0)\,D$ и если переход выполнен в том месте по длине канала, где ширина твердой области K уже не превышает 1/3—1/4 ширины канала B.

Условимся различать понятия функциональных и конструктивных зон. Длина *функциональной зоны* определяется тем процессом, который в ней начинается и завершается. Длина же *конструктивной зоны* соответствует участку червяка с неизменной или монотонно изменяющейся по заданному закону геометрией поперечного сечения канала. Длины функциональных и конструктивных зон не обязательно равны.

Зона питания канала, как правило, выполняется с постоянной глубиной. Длина этой зоны составляет $(4 \div 6)\,D$, включая тот участок канала, который расположен под загрузочным окном. Анализ напорно-расходовой характеристики зоны питания, приведенной в разд. 4.5.1 и 4.5.2, показывает, что при коэффициенте трения полимера по стали $f = 0{,}3 \div 0{,}5$ оптимальным (с точки зрения максимальной производительности) является угол

Таблица 4.2. Геометрические параметры червяков литьевых машин

(значения параметров выражены через наружный диаметр червяка)

Группа червяков	Длина L	Степень сжатия	l_1	h_1	l_2	l_3	h_3
I	$(11\div15)D$	2,0—3,0	$(4—6)D$	$(0,11\div0,18)D$	$(4\div5)D$	$(2\div4)D$	$(0,04\div0,09)D$
II	$(15\div18)D$	1,5—2,0	$(4—5)D$	$(0,11\div0,13)D$	$(11\div13)D$	—	—
III	$(13\div18)D$	2,5—3,0	$(7,5—11,5)D$	$(0,11\div0,13)D$	$2,5D$	$(3\div4)D$	$(0,04\div0,06)D$
IV	$(12\div16)D$	0,8—1,0	—	$(0,10\div0,13)D$	—	—	$(0,1\div0,16)D$

подъема винтовой нарезки $\varphi=(17\div24)°$. Этим значениям φ соответствует шаг нарезки $t=(1,0\div1,5)\ D$. Глубину канала в зоне питания обычно принимают равной $(0,1\div0,2)\ D$, причем меньшие значения соответствуют червякам большего диаметра.

Подводя итог анализа взаимосвязи процессов, протекающих в канале, с геометрией червяка, следует отметить, что в настоящее время наиболее распространены следующие три группы червяков, различающихся размерами и конфигурацией трех основных конструктивных зон канала: зоны загрузки, зоны сжатия (с уменьшающейся глубиной канала) и зоны дозирования.

Группа I: червяки для материалов с широким температурным интервалом размягчения (полистирол и его сополимеры, пластифицированный поливинилхлорид, поликарбонат и др.). Они имеют зону загрузки указанных выше размеров. Зона сжатия с монотонно уменьшающейся глубиной канала — длиной $(7\div13)\ D$. Зона дозирования составляет $(3\div8)\ D$. Желательно, чтобы длина функциональной зоны пластикации совпадала с длиной конструктивной зоны сжатия. Однако не для всех режимов экструзии это выполняется, так как длина зоны пластикации существенно зависит от параметров режима, изготовление же червяков для каждого режима экструзии экономически нецелесообразно. Степень сжатия этих червяков составляет 2,5—3.

Группа II: червяки для материалов с низкой термостабильностью с широким интервалом температур размягчения. Зона загрузки у них такая же, как у червяков группы I, зона сжатия очень длинная (от 12 до 18 D), зона дозирования часто отсутствует. Степень сжатия у этих червяков — от 1,5 до 2.

Группа III: червяки для высококристаллических материалов. В конструктивной зоне питания этих червяков, как отмечалось выше, размещены функциональные зоны питания и пластикации, поэтому длина ее (при указанных выше глубине и шаге нарезки) может достигать $(14\div16)\ D$. Длина зоны сжатия — $(1,5\div2)\ D$. Длина зоны дозирования — $(4\div7)\ D$. Степень сжатия максимальна и составляет 3—4,5.

Ряд общих длин червяков, как отмечалось, регламентирован и составляет 20, 25 и 30 D. Специальные червяки могут иметь длину 35 D и 40 D. Шаг нарезки по условию технологичности

изготовления червяков делают постоянным, если винтовая нарезка выполняется обработкой резанием.

Ширина гребня нарезки e (см. рис. 4.6) обычно принимается от 0,08 до 0,12 D. Увеличение этого параметра приводит к возрастанию мощности, расходуемой на сдвиг расплава в зазоре между гребнем и цилиндром, уменьшение приводит к росту межвитковых утечек.

Величина потока межвитковых утечек пропорциональна третьей степени величины зазора между гребнем и цилиндром. По этой причине если цилиндр или гребень достаточно износились, производительность машины резко уменьшается, что особенно проявляется при работе с головками большого гидравлического сопротивления. Новые цилиндр и червяк должны иметь этот зазор в пределах от $0,002\,D$ до $0,005\,D$, причем первое значение соответствует бóльшим диаметрам червяка. Меньшие величины зазора нежелательны, так как возможно заедание червяка в цилиндре и задиры их рабочих поверхностей.

Червяки пластикаторов, работающих в циклическом режиме, отличаются от рассмотренных выше тем, что общая длина их (и, соответственно, каждая из зон) в среднем на 40—50% меньше. Это оказывается возможным за счет того, что средняя скорость движения материала в канале этих червяков из-за периодических выстоев меньше, чем при стационарном режиме. В табл. 4.2 приведены рекомендуемые соотношения параметров для червяков литьевых машин. Обозначения этих параметров показаны на рис. 4.25.

На рис. 4.26 показана конструкция червяка группы II (см. табл. 4.2). Конец К рабочей части конический. Хвостовик чер-

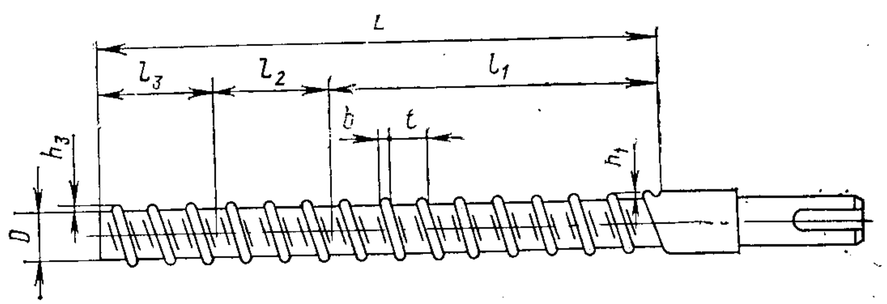
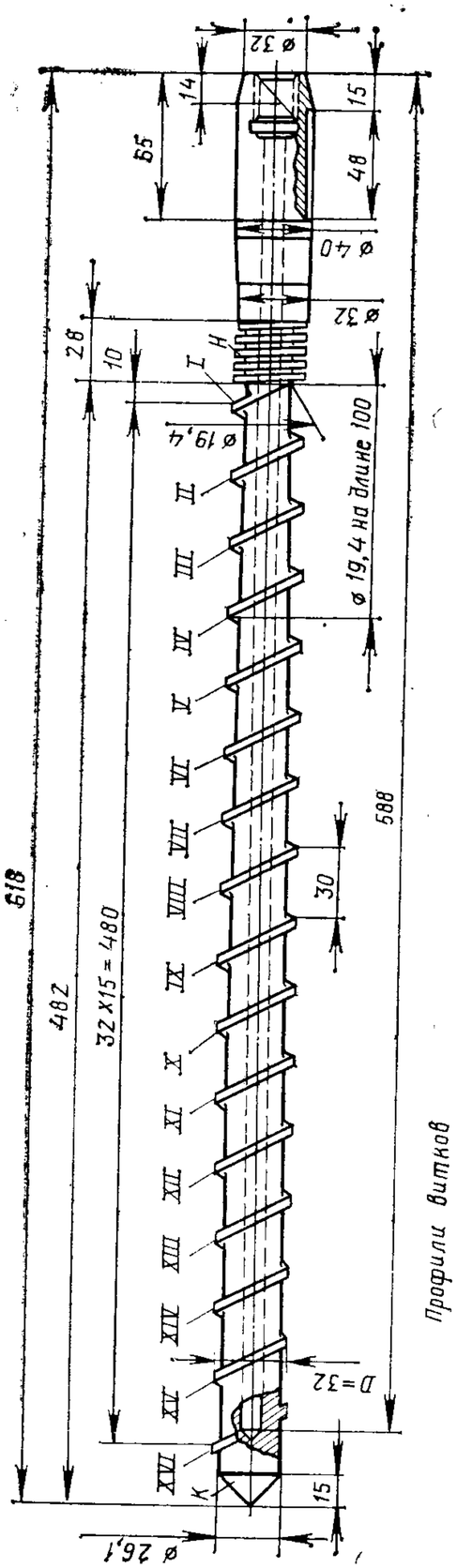


Рис. 4.25. Обозначения параметров червяка к табл. 4.2.



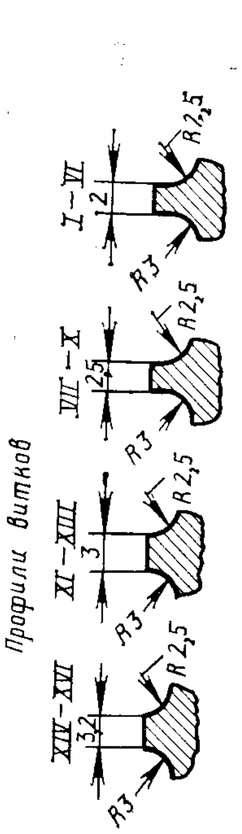


Рис. 4.26. Пример конструкции червяка группы II (см. табл. 4.2).

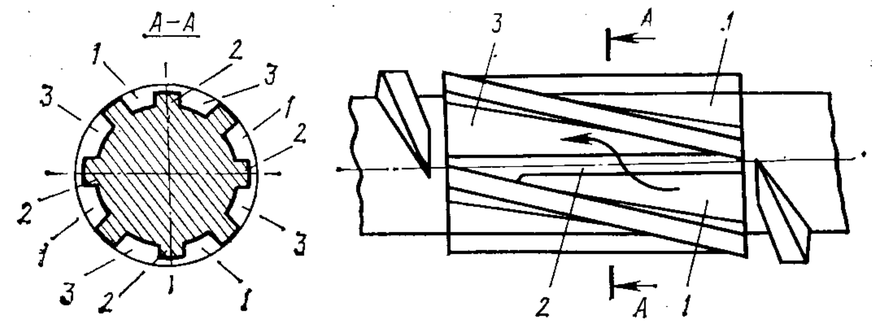


Рис. 4.27. Конструкция элемента, предотвращающего проскок непроплавленных гранул к выходу из канала червяка. Пояснения в тексте.

вяка имеет шлицы, которые входят в шлицевую втулку привода. Внутри червяка выполнено сверление для циркуляции жидкости; резьба на входе в сверление предназначена для монтажа трубки, подающей охлаждающую жидкость. Непосредственно перед рабочей нарезкой выполнена винтовая нарезка *Н* лабиринтного уплотнения, предотвращающая попадание порошка термопласта (или пыли, образующейся при трении гранул во время их транспортирования) в зазор между цилиндром и хвостовиком и далее в узел упорного подшипника.

Отдельные частично оплавленные гранулы, как отмечалось, могут проникать глубоко в зону дозирования и даже появляться на выходе из канала. Во избежание этого помимо увеличения длины червяка на конце его или в начале конструктивной зоны дозирования иногда монтируют специальные элементы, предотвращающие «проскок». Пример такого элемента приведен на рис. 4.27. Расплав с включениями, двигаясь справа налево, попадает во входные полости *1* элемента и, перетекая через тонкий зазор между гребнями *2* и стенкой цилиндра, попадает в выходные полости *3*. Из полостей *3* он продолжает движение к концу червяка. Непроплавленные включения задерживаются перед зазором до тех пор, пока, оплавясь, не смогут пройти через него. Размер их при этом становится столь малым, что они успевают проплавиться до выхода из канала червяка.

Червяки для термопластов и реактопластов изготавливают из стали 40ХН2МА на токарно-винторезных стенках, у которых на суппорте вместо резца установлена фреза с приводом ее во вращение. Винтовой канал фрезеруется за два или три прохода с термической стабилизацией между проходами для снятия напряжений, возникших в процессе обработки. После этого червяки подвергают азотированию. Температура отпуска указанной стали 893 К, а азотирование ведут при температуре 853 К, т. е. ниже температуры рекристаллизации. По этой причине термическая деформация червяков практически не возникает, как если бы это было при объемной или высокочастотной закалке. Только при азотировании удается сохранить строгую прямолинейность оси червяка. Достигаемая при азотировании твердость

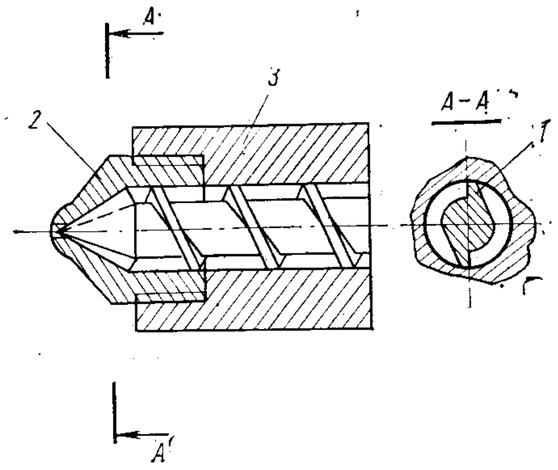


Рис. 4.28. Концевая часть червяка для реактопластов:
1 — ножевая лопасть; *2* — сопло; *3* — цилиндр.

поверхности червяка составляет HRA 70—74. После азотирования рабочую нарезку червяка и хвостовик с шлицами шлифуют.

Червяки для реактопластов. Рабочая нарезка червяков по причинам, указанным в разд. 4.4.4, выполняется с постоянной или даже монотонно возрастающей к концу червяка глубиной (см. табл. 4.2, группа червяков IV). Конец червяка выполняется в виде конуса (рис. 4.28), который часто оснащается ножевыми лопастями *1*. Эти лопасти, практически касаясь конической поверхности сопловой части *2* цилиндра *3*, предотвращают застой в этой полости способного к отверждению реактопласта. В остальном конструкция червяка и технология его изготовления аналогичны описанным выше.

Червяки для резиновых смесей. Резиновые смеси при пластикации должны нагреваться до температуры, гораздо меньшей, чем термопласты (383—403 К). К тому же в машины теплого питания подается смесь, предварительно подогретая на вальцах. По этой причине длина червяков в машинах теплого питания не превышает (5÷6) *D*, а холодного питания — 12 *D*. Длина зоны загрузки составляет (1,2÷1,5) *D*.

Червяки для переработки резиновых смесей, как правило, выполняют двухзаходными, что улучшает смешение и способствует выравниванию температуры в массе пластицируемой смеси. Однако при питании машин лентой резиновой смеси более надежный и стабильный захват ее обеспечивается однозаходными червяками. По этой причине иногда двухзаходные червяки выполняют в области загрузочного окна однозаходными. Шаг нарезки двухзаходных червяков составляет 1,5 *D*, в однозаходной части — (0,6÷0,8) *D*.

Зона сжатия червяков малых и средних диаметров, изготавливаемых обработкой резанием, выполняется с постоянным шагом и монотонно уменьшающейся глубиной нарезки. У червяков с диаметром, большим 160 мм, изготавливаемых литьем, эта зона имеет постоянную глубину нарезки и уменьшающийся шаг. Обеспечиваемая в обоих случаях степень сжатия не превышает двух. Примеры конструкции червяков обоих типов приведены на рис. 4.29.

Термообработка и окончательная обработка рабочей поверхности такие же, как и у червяков для термопластов. На гребни витков червяков с диаметром более 250 мм делается наплавка

твердого сплава с твердостью не менее HRC 50; эти червяки отливаются из стали 45 ЛП.

При проверке прочности червяков нужно учитывать следующие внешние силовые факторы: осевое усилие, возникающее от давления расплава на торцевую поверхность конца червяка, и крутящий момент, подводимый к хвостовику через шпоночное или шлицевое соединение. Наиболее нагруженным является поперечное сечение сердечника червяка под загрузочным окном, так как крутящий момент здесь имеет максимальное значение, а площадь этого сечения минимальна.

Расчету подвергается также шлицевое (или шпоночное) соединение.

Проверять тонкие длинные червяки на продольную устойчивость и на прогиб под действием собственного веса во избежание касания стенок цилиндра не обязательно по следующим причинам. Во-первых, если канал червяка не заполнен материалом, то касание червяка и цилиндра неизбежно вследствие зазоров в шлицевом (или шпоночном) соединении, позволяющих небольшие угловые смещения червяка. Вращение червяка в цилиндре в связи с этим вхолостую, без введения смазки в цилиндр, нежелательно. Если же канал заполнен материалом, то затекающий в зазор между гребнем нарезки и цилиндром расплав образует смазочный слой, надежно предотвращающий касание; червяк оказывается как бы плавающим на этой жидкостной подушке. Она же оказывает и поддерживающее воздействие на червяк, предотвращающее потерю им продольной устойчивости, которая произошла бы, если бы червяк был нагружен аналогичным образом и находился бы вне цилиндра с материалом.

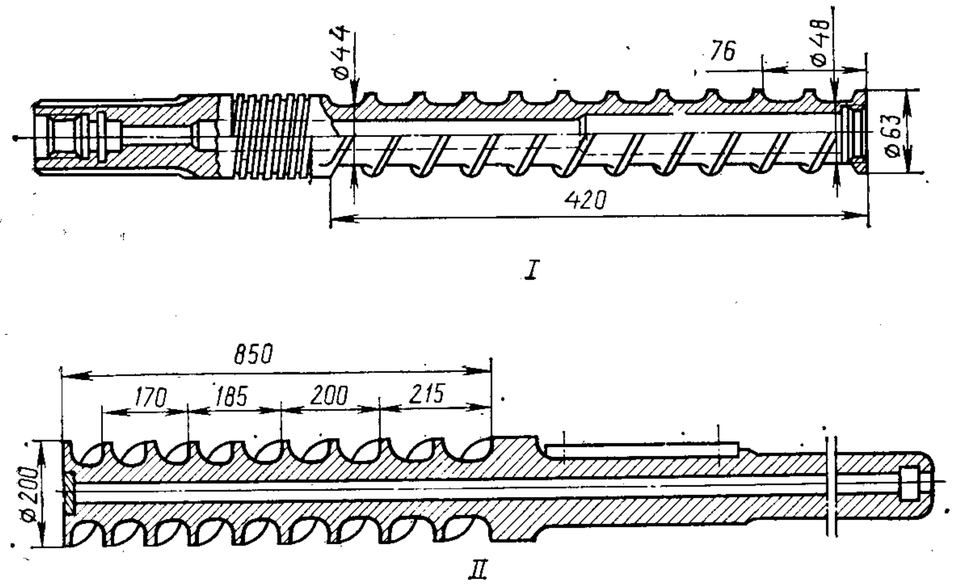


Рис. 4. 29. Червяки шприц-машины для резиновых смесей:
I — с постоянным шагом и монотонно уменьшающейся глубиной нарезки; *II* — с постоянной глубиной нарезки и уменьшающимся шагом.

4.11.2. Цилиндры

Конструкция цилиндра зависит прежде всего от способа его обогрева и в меньшей степени — от диаметра и длины червяка.

Цилиндры машин для термопластов выполняются из круглого проката или цилиндрических поковок. Толщина стенки цилиндра должна быть достаточной, чтобы выдерживать давление расплава до 60 МПа. В цилиндрах литьевых машин на стадии впрыска может развиваться давление до 120—150 МПа.

При работе экструдеров рабочая поверхность цилиндра интенсивно изнашивается, особенно если перерабатывают материалы с абразивными наполнителями. Чтобы продлить срок службы цилиндра в него на всю рабочую длину вставляют тонкостенную втулку из высококачественного материала, чаще всего из стали 38Х2МЮА. Износостойкость рабочей поверхности достигается азотированием, обеспечивающим твердость до HRA 82—86, т. е. на 8—10 единиц больше, чем у червяков, что предотвращает их взаимный задир и попадание стружки в расплав.

Внутренняя поверхность втулки тщательно шлифуется. Наружная поверхность должна надежно прилегать к поверхности цилиндра, иначе общее тепловое сопротивление цилиндра резко возрастает. Прилегание обеспечивается посадкой втулки со значительным натягом. Тонкую втулку с таким натягом запрессовать на всю длину цилиндра не представляется возможным, поэтому часто перед посадкой на место втулку охлаждают в жидком азоте. После износа установленной таким образом втулки выпрессовать ее из цилиндра не удается, ее удаляют расточкой.

На наружной поверхности цилиндра устанавливают электронагреватели.

В ряде режимов работы экструдеров тепло от цилиндра необходимо отводить. Один из современных вариантов конструкции жидкостного охлаждения состоит в том, что на наружной поверхности цилиндра нарезают винтовые канавки и, укладывая в них медные трубки, провальцовывают последние заподлицо с наружной поверхностью цилиндра. Провальцовка создает надежный прижим трубок к поверхности канавок и плотный контакт электронагревателей с цилиндром.

Цилиндр имеет ряд радиальных несквозных сверлений под установку термопар, число которых соответствует числу секций обогрева — охлаждения.

По причинам, отмеченным в разд. 4.4.1, цилиндр в окрестности загрузочного окна имеет интенсивное водяное охлаждение. Каналы для циркуляции воды могут быть выполнены в виде рубашки, привариваемой к телу цилиндра. Если часть цилиндра у загрузочного окна выполняется в виде самостоятельной детали, то она может быть изготовлена литьем сразу с полостью для циркуляции воды. Выполнять ее отдельно от

обогреваемой части цилиндра рекомендуется еще и для того, чтобы свести к минимуму нежелательный теплообмен между основной (обогреваемой) и загрузочной (охлаждаемой) частями цилиндра.

Конец цилиндра у загрузочного окна имеет фланец для крепления его к узлу упорного подшипника болтами.

У экструдеров больших типоразмеров с откатными цилиндрами (см. рис. 4.3, поз «*д*») вместо фланцевого соединения на болтах часто выполняют быстроразъемное байонетное соединение.

Противоположный конец цилиндра также оснащен фланцем с четырьмя откидными болтами для крепления головки. Этот фланец часто выполняется съемным (на резьбе), так как некоторые конструкции головок для крепления на цилиндре требуют фланцев и переходников специальной конструкции.

Прочностному расчету подвергаются фланцы и места их крепления. Толщина стенки цилиндров рассчитывается как у толстостенных сосудов, работающих под внутренним давлением.

Цилиндры машин для резиновых смесей, как правило, имеют развитую рубашку жидкостного термостатирования и выполняются литыми (в последних моделях — преимущественно сварными или комбинированной, сварно-литой конструкции). Пример сварной конструкции приведен на рис. 4.30. Втулка-гильза *2* и приваренный к ней фланец *1* являются сменными деталями и по мере износа рабочей поверхности заменяются новыми. Охлаждающая жидкость (или греющий пар, подающийся перед началом работы для вывода рабочих органов на нужный температурный режим) подается в рубашку *9* и отводится из нее через штуцеры *7а* и *7б*. Непосредственный контакт жидкости с телом втулки — одно из существенных преимуществ данной конструкции.

В целях обеспечения смены втулок при их износе соединение втулка — корпус выполнено по посадке с зазором. Во избежа-

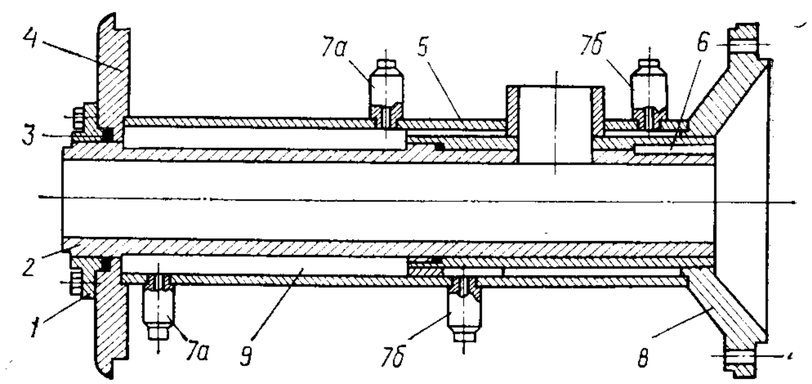


Рис. 4.30. Цилиндр шприц-машины для резиновых смесей:
1 — фланец втулки; *2* — втулка; *3* — уплотнительное кольцо; *4* — фланец крепления головки; 5 — корпус; *6* — шпонка; *7а*, *7б* — штуцеры; *8* — фланец крепления цилиндра.

ние проворота втулки в корпусе под воздействием крутящего момента, передающегося на нее с червяка через резиновую смесь, в соединение втулка — корпус введена шпонка *6*.

4.11.3. Фильтры

Между цилиндром экструдера *1* и головкой *2* (рис. 4.31) часто устанавливают решетку *3* с одной или несколькими сетками *4* перед ней. Основное назначение этих элементов — очистка поступающего в головку расплава от случайных включений. Это особенно необходимо при переработке отходов (обрезки пленки, дробленые бракованные изделия), так как даже при соблюдении чистоты в производственных помещениях во время складирования брака и отходов и транспортирования их на переработку материал, электризуясь при взаимном трении, притягивает к себе некоторое количество пыли.

Для формования ряда изделий (в первую очередь, тонких пленок) необходима подготовка расплава с повышенной температурной однородностью. В этих случаях решетки с пакетами сеток устанавливают, даже если материал совершенно не имеет инородных включений. Предназначены они преимущественно для удержания неполностью проплавленных частиц материала, периодически появляющихся на выходе из канала червяка. Пребывая на сетках, непроплавленные частицы в конце концов плавятся полностью и проходят через них.

Твердые посторонние включения постепенно забивают сетки, увеличивая их гидравлическое сопротивление. Это приводит к росту давления на выходе из канала червяка и падению производительности экструдера. Как только производительность достигает минимально допустимой величины (как правило, не менее 70% от начального ее значения), производят замену сеток. Если конструкция решетки с пакетом сеток такая, как на рис. 4.31, то требуется остановка экструдера и, следовательно, всего агрегата, в составе которого он работает. После остановки необходимо снять головку, очистить входной ее канал от расплава и только затем вынуть решетку с сетками.

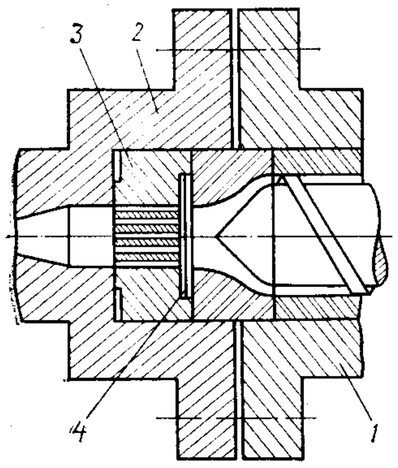


Рис. 4.31. Фильтр закладной конструкции:
1 — экструдер; *2* — головка; *3* — решетка; *4* — сетки.

Операция по замене сеток значительно упрощается, если на экструдере установлен фильтр шиберной конструкции (рис. 4.32). Прямоугольная пластина *1* шибера имеет возможность перемещаться вправо в прямоугольном пазу, образованном корпусом фильтра *6* и органичительной плитой

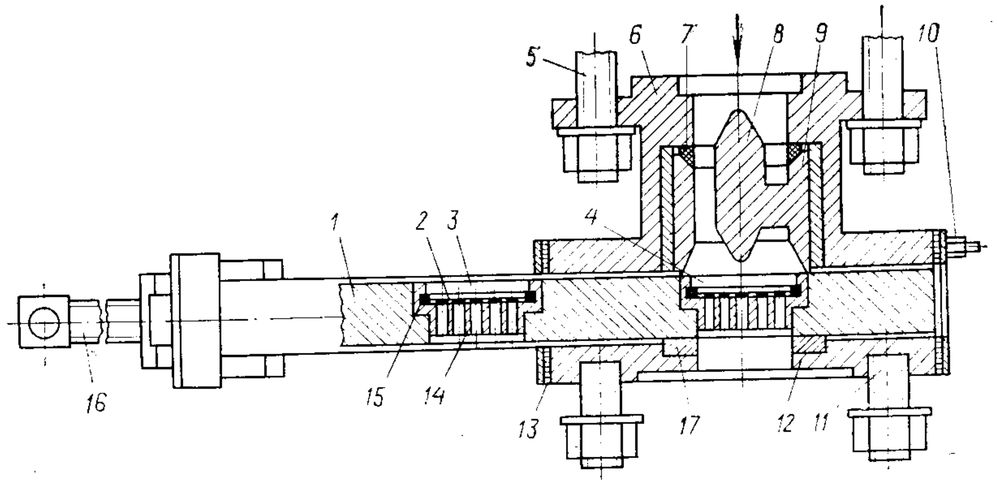


Рис. 4.32. Фильтр шиберной конструкции:
1 — шибер; *2* — сетки; *3*, *4* — гнезда для установки решетки с ситами; *5*, *11* — шпильки; *6* — корпус фильтра; *7* — фторопластовая прокладка; *8* — сердечник втулки; *9* — втулка; *10* — термопара; *12* — ограничительная плита; *13* — электрообогрев; *14* — решетка; *15* — пружинное разрезное кольцо; *16* — ходовой винт; *17* — опорное кольцо.

12. Шпильками *5* фильтр крепится к цилиндру экструдера, шпильками *11* укрепляется на фильтре головка. Перемещение шибера вправо (или обратно в положение, показанное на рисунке) осуществляется вручную с помощью ходового винта *16*. Шибер имеет гнезда *3* и *4* под установку двух комплектов решеток *14* с сетками *2*, укрепляемыми в них с помощью пружинных разрезных колец *15*. Пока один комплект работает, другой извлекают из гнезда и вставляют в него новые сетки.

Особенно ответственные места этой конструкции — уплотнения пластины шибера *1* с корпусом *6* и плитой *12*. Большие контактные напряжения между пластиной шибера *1* и плитой *12* обусловлены тем, что площадь их контакта уменьшена за счет введения в плиту опорного кольца *17*. Шибер прижимается к кольцу давлением расплава, воздействующим на сетки. По другую сторону от шибера уплотнение достигается прижатием к нему втулки *9*. При такой конструкции возникают две осевые силы на втулке, прижимающие ее к шиберу: первая — от расклинивающего эффекта эластичной фторопластовой прокладки *7*, вдавливаемой в конический зазор давлением расплава и вторая — равнодействующая касательных напряжений, возникающих на поверхности контакта втулки с расплавом, вследствие течения последнего. Введение обтекаемого сердечника *8*, укрепленного на втулке, увеличивает поверхность ее контакта с расплавом и, следовательно, равнодействующую касательных напряжений.

Как правило, экструдер работает в едином агрегате с еще несколькими машинами (тянущее и отрезное устройства, каландры и др.), скорость работы которых строго согласуется с производительностью экструдера. Если производительность из-за постепенного засорения сеток монотонно уменьшается, то

возникает необходимость постоянной подстройки режимов работы других машин. Однако если используется фильтр конструкции, приведенной на рис. 4.32, то можно принять следующий режим работы агрегата: не делать многократных коррекций производительности агрегата при снижении производительности экструдера до минимально допустимой величины, а каждый раз вместо коррекции производить замену сеток.

Есть два препятствия на пути реализации этого рационального режима. Во-первых, это неизбежная остановка агрегата, так как перемещение шибера винтом *16* вручную вызывает перекрытие потока не менее чем на 10 с. Это препятствие легко устраняется, если вместо винта шибер оснащается достаточно мощным гидроцилиндром. Полное перемещение шибера в этом случае происходит за десятые доли секунды и практически не вызывает разрыва технологического потока материала. Во-вторых, частая смена сеток превращается в трудоемкую операцию. Этот недостаток фильтров со сменными сетками привел к созданию конструкций с промываемыми фильтрующими элементами.

Пример такой конструкции приведен на рис. 4.33. Направление потока расплава показано жирной линией со стрелками. В позиции, показанной на рис. 4.33, *а*, работает правый фильтрующий элемент. Когда степень загрязнения его достигает предельной величины (контролируется датчиком давления расплава, установленным перед фильтром), пробковые краны переключаются в положения, показанные на рис. 4.33, *б*. При этом начинает работать левый фильтр, а часть вышедшего из него потока направляется на промывку правого фильтра обратным током. Эта часть потока, загрязненная смытыми с правого фильтра включениями, сливается в дренажный канал. По завершении промывки краны переводятся в положения, показанные на рис. 4.33, *в*: работает левый фильтр, правый подготовлен к работе.

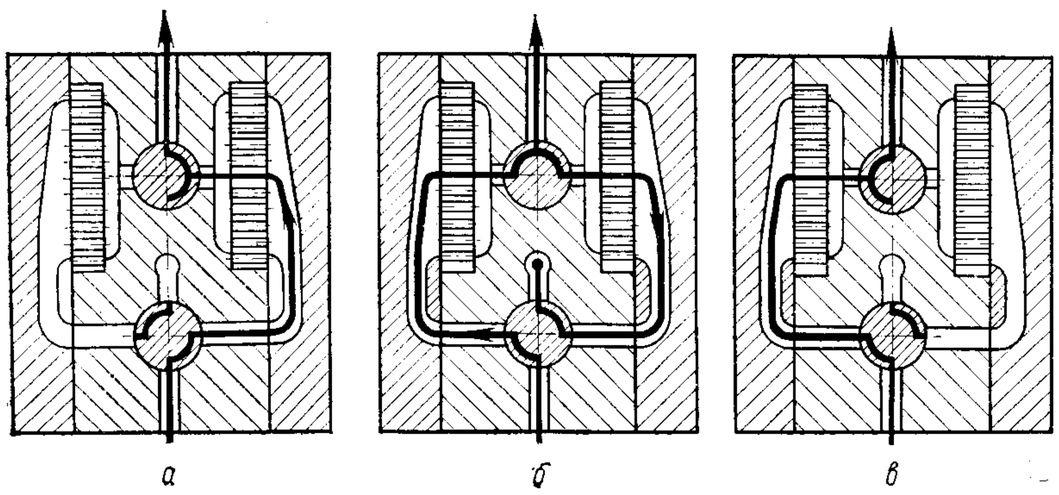


Рис. 4.33. Двухэлементный фильтр, работающий в режиме периодической промывки фильтрующих элементов. Пояснения в тексте.

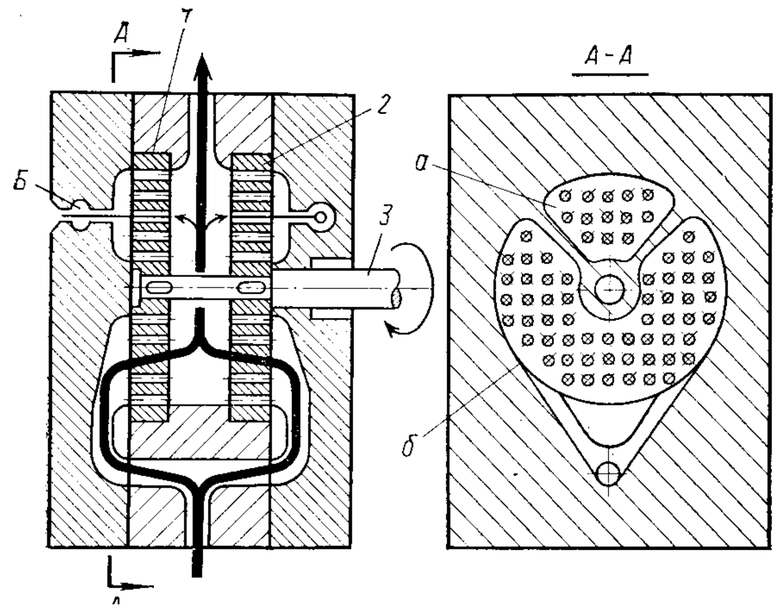


Рис. 4.34. Фильтр с непрерывной промывкой элементов:
1, *2* — фильтрующие элементы; *3* — приводной вал.

Несмотря на то, что при работе с двухэлементными фильтрами типа показанных на рис. 4.33 пульсации производительности из-за засора элементов сведены к минимуму, для некоторых типов изделий (например, часть пленок, потребляемых электротехнической промышленностью) даже такое непостоянство расхода, вызывающее продольную разнотолщинность пленки, оказывается недопустимым. Пульсации полностью исчезают, если экструдер работает с фильтром, в котором происходит непрерывная промывка элементов (рис. 4.34). Каждый из элементов *1* и *2* вращается совместно с приводным валом *3*. В зоне *«б»* каждый из дисковых элементов работает на фильтрацию, а в зоне *«а»* непрерывно выполняется промывка поступающей в нее загрязненной части элемента. Часть расплава, пошедшая на промывку, сливается в дренажный канал *Б*. Частота вращения элементов не превышает 1 об/мин.

4.11.4. Упорный подшипник

При работе экструдеров с головками, имеющими большое гидравлическое сопротивление, осевое усилие, возникающее на червяке, может быть очень большим. Так, для червяков с диаметром 160 мм оно часто превышает 1 МН. В связи с этим упорный подшипник, воспринимающий осевое усилие, — один из ответственных узлов червячной машины.

На рис. 4.35 показана конструкция узла подшипника машины средней мощности (диаметр червяка 160 мм). Подшипник конический роликовый упорный тяжелой серии. В машинах с диаметром червяка менее 90 мм часто используют шариковые упорные подшипники. В более тяжелых машинах — двухрядные

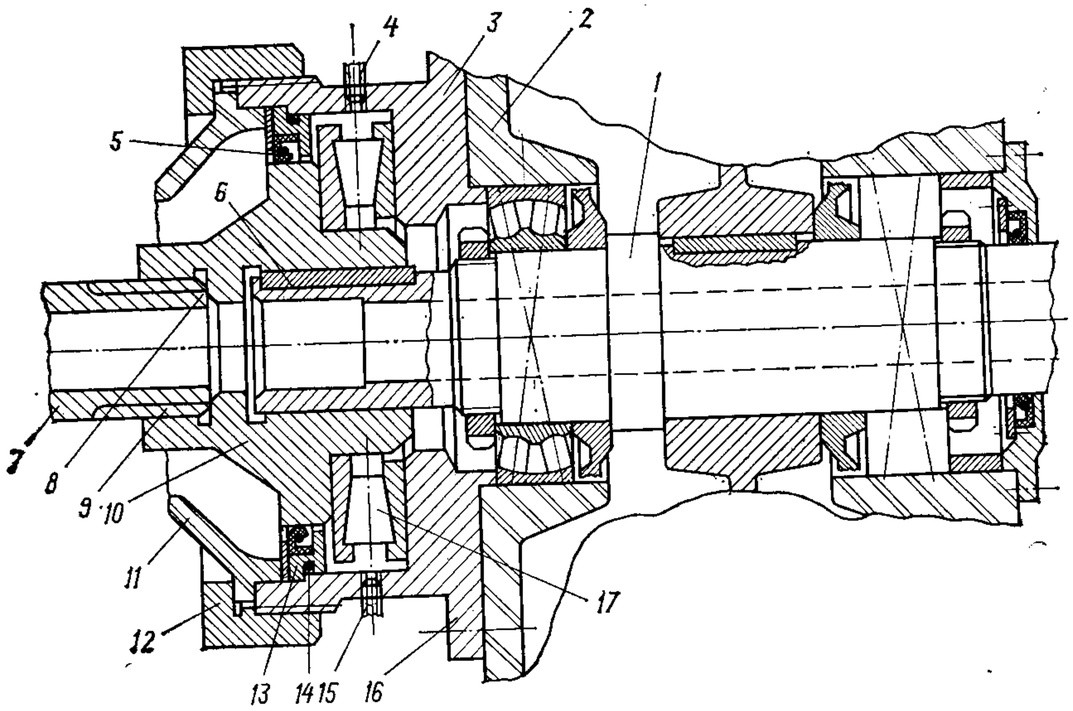


Рис. 4.35. Выходной вал редуктора и узел упорного подшипника:

1 — выходной вал редуктора; *2* — корпус редуктора; *3* — корпус подшипника; *4, 15* — штуцеры; *5* — сальниковое подвижное уплотнение; *6* — шпонка; *7* — червяк; *8* — торцевая поверхность хвостовика червяка; *9* — шлицевое соединение; *10* — приводная втулка; *11* — пластикационный цилиндр; *12* — накидная гайка; *13* — шайба; *14* — кольцевое неподвижное уплотнение; *16* — шпилечное соединение; *17* — упорный подшипник.

роликовые цилиндрические упорные подшипники. При подборе подшипников минимально допустимый срок их службы принимают не меньшим, чем период работы машины между капитальными ремонтами.

В приведенной конструкции крутящий момент передается с выходного вала редуктора *1* через шпонку *6* приводной втулке *10* и затем через шлицевое соединение *9* червяку *7*. Осевое усилие торцевой поверхностью *8* хвостовика червяка передается поверхности втулки; с втулки, минуя вал редуктора, это усилие передается упорному подшипнику *17* и затем корпусу подшипника *3*.

Пластикационный цилиндр *11* крепится к корпусу упорного подшипника *3* с помощью накидной гайки *12* (возможно также крепление с помощью фланцевого соединения или байонетного затвора). Все эти детали также входят в цепь передачи крутящего момента и осевого усилия (см. разд. 4.2). Прочностной расчет их должен выполняться с учетом этих силовых факторов.

Если пластикационный цилиндр крепится только к упорному подшипнику, то шпилечным соединением *16* корпуса подшипника с корпусом редуктора *2* должно создаваться такое усилие затяжки, которое, во-первых, препятствовало бы провороту деталей *3* и *2* под воздействием крутящего момента, и во-вторых,

предотвращало бы расстыковку соединения этих деталей под воздействием опрокидывающего момента от силы суммарного веса цилиндра, червяка и бункера с материалом.

Несмотря на высокий к.п.д. упорного подшипника потери мощности в нем настолько велики, что приводят к ощутимому его разогреву. При этом разогрев оказывается тем сильней, чем быстроходнее машина и больше диаметр червяка. По этой причине только у тихоходных машин с малым диаметром допускается консистентная смазка упорного подшипника. Во всех других конструкциях упорный подшипник имеет обильную принудительную жидкую смазку (ввод ее и вывод — через штуцеры *4* и *15* на рис. 4.35 соответственно), выполняющую одновременно и функцию охлаждающей жидкости. Подшипник, как правило, включается в систему принудительной смазки редуктора.

Отсутствие утечек масла из полости упорного подшипника, где уровень масла при нормальной работе не бывает выше пунктирной линии (см. рис. 4.35), обеспечивается шайбой *13*, укрепленной в корпусе *3* и имеющей кольцевое неподвижное *14* и сальниковое подвижное *5* уплотнения.

Центральное осевое отверстие в выходном валу редуктора предназначено для подачи в червяк и отвода охлаждающей жидкости.

4.11.5. Узел подвода жидкости к червяку

На рис. 4.36 показан один из возможных конструктивных вариантов устройства для подвода жидкости к червяку (все многочисленные варианты отличаются преимущественно конструкцией уплотнения). Втулка *1* вводится в полый выходной вал редуктора (см. рис. 4.35) и левым резьбовым концом плотно ввертывается в резьбовое отверстие хвостовика червяка (см. рис. 4.26); правый конец втулки с шестигранником под ключ находится вне отверстия вала. Продолжением втулки *1* является наконечник *12*, плотно ввинченный в нее. На наконечнике монтируется все устройство.

Жидкость подводится через угольник *9*, из которого через трубку *2*, введенную до конца центрального отверстия в червяке, поступает в него. Возвращаясь назад через кольцевое пространство между трубкой и червяком (а затем, втулкой *1* и наконечником *12*), жидкость охлаждает его. Отработавшая жидкость свободно сливается через патрубок *11*.

Уплотнение сливной полости *10* обеспечено торцевым уплотнением, образованным неподвижным *4* и подвижным *5* дисками. Они прижимаются друг к другу упругим элементом в виде сильфона *6*, герметично напаянного слева на подвижный диск *5*, а справа — на накидную гайку *7* наконечника втулки *12*.

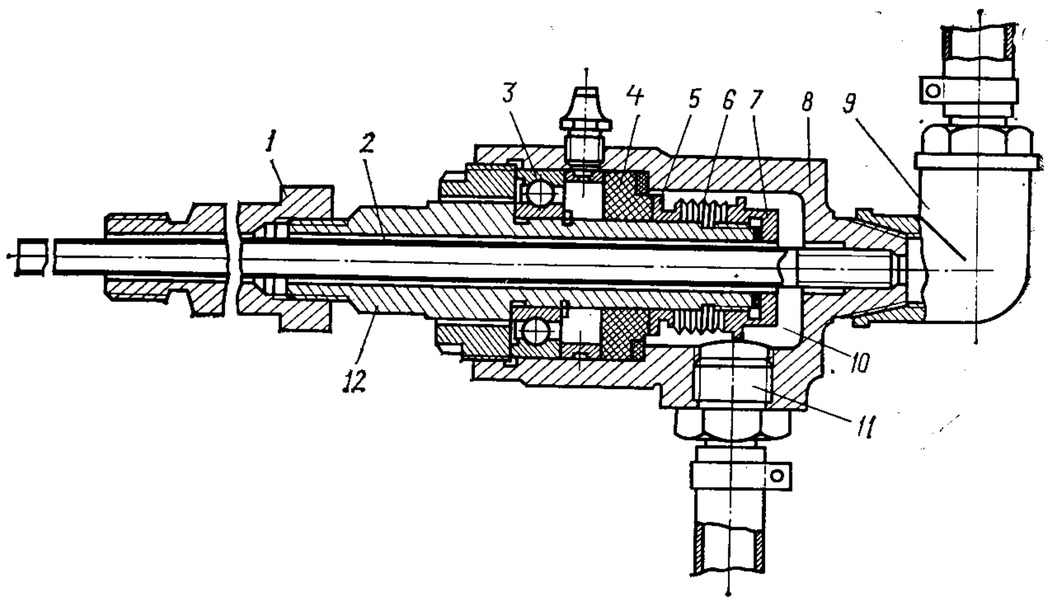


Рис. 4.36. Устройство для подвода охлаждающей жидкости к червяку:
1 — втулка; *2* — трубка; *3* — подшипник; *4* — неподвижный диск; *5* — подвижный диск; *6* — сильфон; *7* — накидная гайка; *8* — корпус; *9* — угольник; *10* — сливная полость; *11* — патрубок.

Корпус *8* некоторых типов устройств оснащен окном для визуального контроля расхода, напорный трубопровод с этой же целью снабжается ротаметром.

4.12. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЧЕРВЯЧНОЙ МАШИНЫ

4.12.1. Системы теплоснабжения

Наиболее распространенными являются системы, в которых применяются: а) электрообогрев в сочетании с принудительным охлаждением водой или воздухом (реже — другими охлаждающими средами); б) термостатирование (нагрев и охлаждение) с помощью жидких или парообразных теплоносителей.

Первая система применяется в универсальных пластицирующе-выдавливающих машинах для термопластов. Эта система включает в себя следующие элементы: водяное охлаждение зоны питания цилиндра (без автоматического регулирования в процессе работы), водяное охлаждение червяка (также без автоматического регулирования), обогрев — охлаждение цилиндра (автоматическое поддержание температуры цилиндра с заданной точностью). Применяется эта система также и в пластикаторах для реактопластов. Система теплоснабжения пластикаторов, работающих в циклическом режиме, как правило, не включает в себя охлаждения цилиндра и червяка: вследствие значительной доли выстоя в общем цикле работы средняя интенсивность теплогенерации при деформировании материала в

канале червяка ниже, чем при стационарном режиме, так что генерируемое тепло не превышает того, которое необходимо для нагрева материала, и излишки тепла, которые нужно было бы отводить, отсутствуют.

Вторая система имеет две основные области применения. Одна область — это машины для переработки резиновых смесей. Практически при всех режимах их работы диссипативные тепловыделения намного превосходят количество тепла, необходимое для разогрева материала до нужной температуры, и основная функция системы — интенсивное охлаждение. Требуемые температуры цилиндра и червяка в этом случае лежат в области 373 К, так что наилучшей термостатирующей жидкостью является умягченная вода, циркулирующая по замкнутому контуру. Этот контур включает в себя термостат, поддерживающий нужную температуру жидкости. Следует, однако, отметить, что при пуске холодной машины требуется прогрев рабочих органов до указанной температуры. Обогрев возможен этой же водой. Но если для охлаждения в установившемся режиме используется не термостатируемая, а водопроводная проточная вода, сбрасываемая в канализацию, то при пуске для разогрева используют насыщенный водяной пар.

Другая область применения — это крупные узкоспециализированные установки (например, смесители) для термопластических материалов, работающие при температуре рабочих органов до 623 К. Наиболее распространенными термостатирующими жидкостями в таких установках являются перегретая вода (до 493 К) и высококипящие теплоносители. Применение последних оправдано, если рабочая температура превышает 493 К, так как теплоемкость и теплопроводность их намного ниже, чем у воды, токсические же выделения требуют надежной герметизации всей системы.

Вторая (полностью жидкостная) система теплоснабжения имеет следующие преимущества, обусловленные тем, что как подвод, так и отвод тепла от цилиндра и червяка осуществляется одной и той же жидкостью при практически постоянной (± 1 К) температуре ее: однородность температуры поверхности рабочих органов и малые колебания этой температуры (не более ± 2 К).

Точность поддержания заданной температуры цилиндра при использовании первой из рассмотренных систем теплоснабжения зависит от применяемой при этом системы терморегулирования.

4.12.2. Системы терморегулирования

Эти системы могут быть двух-, трех- и четырехпозиционными. Простейшая двухпозиционная система работает следующим образом. При включенных электронагревателях цилиндра установленный в нем датчик температуры (например, термопара)

подает сигнал, соответствующий фактической температуре его $T_ф$, на прибор-регулятор. Прибор непрерывно сравнивает этот сигнал с заданной его величиной $T_{з1}$. Если $T_ф < T_{з1}$, то регулятор сохраняет команду на включенное положение нагревателей. Как только достигается обратное неравенство $T_ф > T_{з1}$, регулятор дает команду на отключение нагревателей, причем повторное включение происходит после того, как знак неравенства вновь сменится на обратный.

После отключения нагревателей температура рабочей поверхности цилиндра продолжает еще некоторое время возрастать за счет того, что происходит переток тепла от более нагретой части цилиндра, расположенной в непосредственной близости от нагревателей, к менее нагретой части к окрестности рабочей поверхности. Причем величина этого «выбега» температуры, равного $+\Delta T = T_ф^{макс} - T_{з1}$, тем больше, чем больше установленная мощность нагревателей.

Точно так же после выключения нагревателей температура рабочей поверхности цилиндра продолжает еще некоторое время понижаться, так как тепловая волна от включившихся нагревателей, распространяясь в теле цилиндра, достигает рабочей поверхности не мгновенно. Величина этого снижения $-\Delta T = T_ф - T_{з1}$ зависит от толщины стенки цилиндра.

Фактическое колебание температуры, равное $(+\Delta T) - (-\Delta T) = T_ф^{макс} - T_ф^{мин}$ при двухпозиционной системе «включено — выключено» составляет 10—14 К. Пути уменьшения этого колебания ясны из рассмотренного: во-первых, уменьшение теплового потока от нагревателей по мере приближения величины $T_ф$ к значению $T_{з1}$, во-вторых, включение охлаждения цилиндра одновременно с отключением нагревателей. Первый путь реализован в трехпозиционной системе регулирования.

При трехпозиционной системе регулятор сравнивает $T_ф$ уже с двумя заданными величинами: требуемой температурой цилиндра $T_{з1}$ и температурой $T_{з2}$, на 5—10 К меньшей, чем $T_{з1}$. При пуске машины $T_ф < T_{з2}$, и нагреватели постоянно включены. Как только достигается ситуация $T_ф > T_{з2}$, регулятор дает команду на импульсное включение нагревателей. Специальный импульсный дозатор начинает периодически выключать нагреватели, уменьшая тем самым средний отдаваемый ими тепловой поток. При достижении неравенства $T_ф > T_{з1}$ нагреватели отключаются полностью. Колебания $T_ф$ при этой системе не превышают ± 5 К. Если же при этом используется пропорциональный дозатор, задающий импульсы включения с переменной длительностью, уменьшающейся пропорционально уменьшению размерности $T_{з1} - T_ф$, то колебания могут быть снижены до ± 2 К.

При четырехпозиционной системе терморегулирования появляются уже три задаваемые величины: те же $T_{з1}$ и $T_{з2}$, а также $T_{з3}$, на 4—6 К большая, чем $T_{з1}$. Как только, продолжая возрастать после выключения нагревателей, температура цилиндра $T_ф$

превысит $T_{з3}$, регулятор дает команду на включение водяного или воздушного охлаждения цилиндра. Команда на отключение охлаждения подается после того, как будет достигнуто неравенство $T_ф < T_{з3}$.

Возможен также вариант трехпозиционной системы с точками сравнения $T_{з1}$ и $T_{з3}$, т. е. с автоматическим включением нагревателей и охлаждения, но без дозированного снижения мощности обогрева. Именно эта система используется в современных универсальных экструдерах. Самая же совершенная — четырехпозиционная применяется для машин, которыми оснащаются агрегаты по производству особо точных изделий и тонких пленок.

4.12.3. Устройство элементов систем теплоснабжения

Конструкция цилиндра, предназначенного для работы с жидкостной системой теплоснабжения (см. рис. 4.30), а также конструктивные элементы системы охлаждения червяка (см. рис. 4.29, 4.35, 4.36) уже рассматривались; в связи с этим здесь описаны лишь элементы системы электрообогрева с водяным (воздушным) охлаждением.

Цилиндр имеет несколько независимых зон обогрева — охлаждения. Длина каждой зоны, как правило, не превышает наружного диаметра цилиндра. Таким образом, общее количество зон составляет от 3 до 7 (тем больше, чем больше типоразмер машины). Каждая из зон имеет свои нагреватели, змеевик для воды (или вентилятор), введенную в тело цилиндра термопару и терморегулятор.

В современных конструкциях машин применяются два типа электронагревателей, различных по принципу действия: нагреватели омического сопротивления и индукционные.

Конструкция нагревателя омического сопротивления показана на рис. 4.37. Собственно нагреватель *7* представляет собой ленту нихрома *9*, спирально намотанную на слой миканита *8*. Концы ленты присоединены к штырям клеммного разъема *6*. Лента электроизолирована от листов *10* кожуха нагревателя двумя слоями миканита *8*. Нагреватель достаточно гибок, и при вывернутых винтах *12* стяжного устройства *11* концы его могут быть свободно разведены на расстояние, большее наружного диаметра цилиндра. Замена какого-либо нагревателя, таким образом, не представляет труда. Надежный контакт нагревателя с цилиндром, улучшающий эффективность теплоотдачи, обеспечивается стяжным устройством *11*.

Кожух *3* с теплоизоляцией *4* и экраном *5* уменьшает теплоотдачу в окружающую среду. Если используется воздушное охлаждение, то он образует кольцевое пространство для омывания цилиндра охлаждающим воздухом. Следует заметить, что работа воздушного охлаждения совместно с омическим элект-

рообогревом недостаточно эффективна: при подаче воздуха прежде чем начнет охлаждаться цилиндр, должен охладиться электронагреватель, но даже и после этого значительное сопротивление его снижает теплоотвод от цилиндра к воздуху. При индукционном же электрообогреве воздух имеет возможность непосредственно омывать большую часть поверхности цилиндра.

Помимо указанного индукционный обогрев имеет и другие преимущества: тепло генерируется непосредственно в теле цилиндра, поэтому обогрев мало инерционен и обеспечивает бóльшую точность поддержания температуры при тех же технических средствах; к тому же теплопотери в окружающую среду невелики.

Конструкция индукционного нагревателя показана на рис. 4.38. К цилиндру *1* винтами *5* диаметрально противоположно прикреплены два башмака *4*. К башмакам винтами *7* с накладками *6* прикреплены магнитопроводы *2* с надетыми на них индукционными катушками *3*. Каждый из магнитопроводов совместно с башмаками и цилиндром образует свой замкнутый магнитный контур (показаны штриховыми линиями).

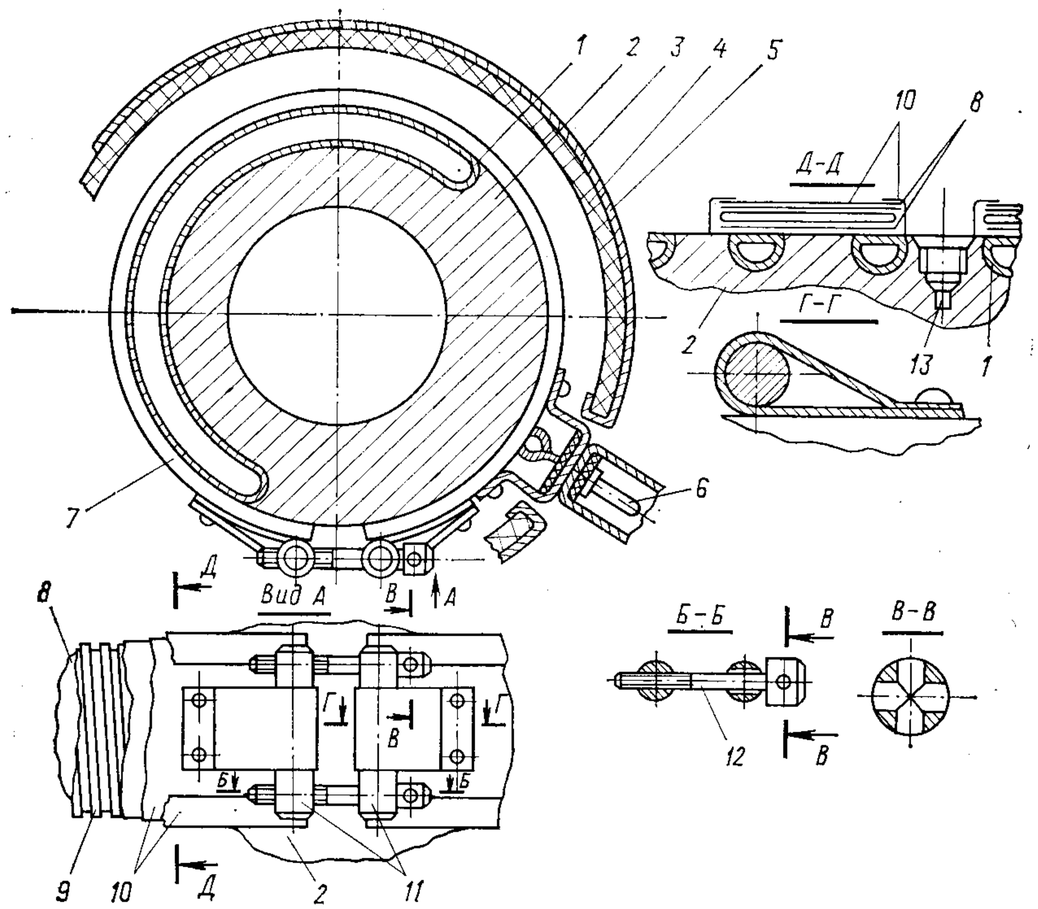
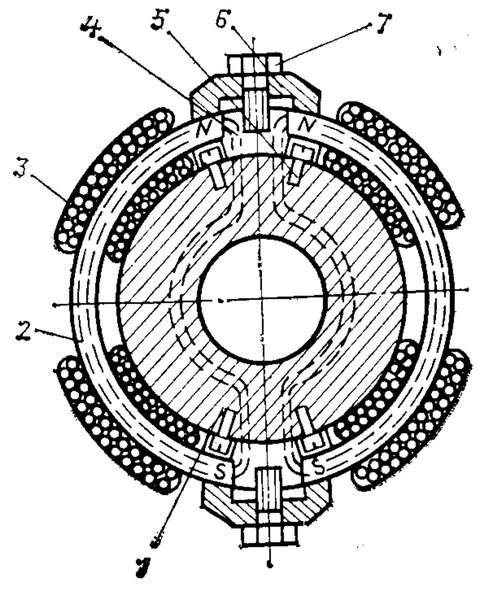


Рис. 4.37. Конструкция электронагревателя омического сопротивления:
1 — трубка-змеевик водяного охлаждения; *2* — пластикационный цилиндр; *3* — кожух; *4* — теплоизоляция; *5* — экран; *6* — клеммный разъем для подвода напряжения к нагревателю; *7* — электронагреватель сборный; *8* — электроизолятор (миканит); *9* — лента нихрома; *10* — кожух электронагревателя; *11* — стяжное устройство; *12* — винт; *13* — отверстие для термопары.

Рис. 4.38. Индукционный нагреватель:
1 — пластикационный цилиндр; *2* — магнитопровод; *3* — индукционная катушка; *4* — башмак; *5*, *7* — винты; *6* — накладка.



В катушках течет переменный ток промышленной частоты плотностью 3—5 А/мм², индуцируя в магнитных контурах переменное магнитное поле. Пульсации его вызывают возникновение в поверхностном слое тела цилиндра толщиной 20—25 мм вихревых токов, приводящих к разогреву цилиндра. Если обогрев работает совместно с воздушным охлаждением, то магнитопроводы монтируются таким образом, чтобы между катушками и цилиндром оставался значительный зазор.

4.13. ПРИВОД ЧЕРВЯКА

К приводу червяка предъявляются следующие требования: 1) обеспечение необходимой мощности, подводимой к червяку машины; 2) возможность бесступенчатого регулирования частоты вращения червяка в широком диапазоне; 3) поддержание постоянства частоты вращения червяка с точностью ±2% при заданном режиме работы пластикатора, несмотря на возможные неконтролируемые пульсации момента сопротивления на червяке или напряжения в силовой и электрической сети в пределах ±15%; 4) обеспечение требуемой зависимости между задаваемой частотой вращения червяка и необходимым для ее реализации крутящим моментом.

Первое требование носит общий характер, и ему может удовлетворить практически любой тип двигателя. Необходимая мощность его может быть рассчитана по формулам, приведенным в разд. 4.5—4.8, как суммарная мощность, рассеиваемая во всех функциональных зонах червяка.

Последнее требование может быть конкретизировано при анализе формул для расчета потребляемой в зонах мощности W. Из этих формул видно, что момент сопротивления на червяке, равный W/N (где N — частота вращения червяка), пропорционален частоте вращения N (или окружной скорости червяка V) в степени $\alpha \leqslant 1$ (см. кривую *1* на рис. 4.39). На этом же графике

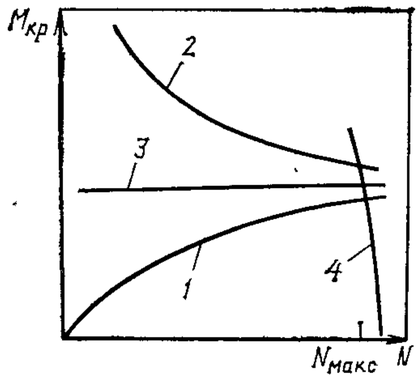


Рис. 4.39. Рабочая характеристика момента сопротивления на червяке $M_{кр}$ (*1*) и характеристики различных типов привода (*2*, *3* — двигатели постоянного тока при различных способах регулирования частоты вращения N, *4* — двигатель переменного тока).

показаны рабочие характеристики различных типов привода. Типу характеристики *3* отвечает также и гидравлический двигатель.

Как видно из рис. 4.39, если мощность двигателя согласована с мощностью, потребляемой червяком при максимальной частоте его вращения, то практически все типы привода могут обеспечить работу экструдеров в соответствии с последним, четвертым требованием.

Относительно второго требования нужно сказать следующее. Из табл. 4.1 видно, что полный диапазон максимальных частот вращения червяков в современных машинах составляет 50—250 об/мин. Рабочие же диапазоны частот вращения большинства электродвигателей — от 400 до 3000 об/мин. Отсюда очевидна необходимость введения редуктора в кинематическую схему привода. Бесступенчатое регулирование частоты вращения обеспечивается с помощью гидравлических или механических вариаторов, гидродвигателей и электродвигателей постоянного тока. Потери мощности в вариаторах относительно велики, поэтому их используют в сочетании с асинхронными двигателями только в машинах малых типоразмеров. Машины средних и больших типоразмеров оснащаются двигателями постоянного тока. Достаточная степень универсальности машин обеспечивается, если частоту вращения можно регулировать в диапазоне 1 : 20 (см. табл. 4.1). Вариаторы и некоторые типы электродвигателей постоянного тока имеют диапазон регулирования от 1 : 1,5 до 1 : 4; ясно, что при этом в схему привода приходится вводить двухступенчатую коробку скоростей. Современные двигатели постоянного тока с тиристорным типом управления имеют диапазон регулирования от 1 : 15 до 1 : 20, поэтому при их использовании схема привода получается наиболее простой; к тому же данный привод полностью отвечает третьему из отмеченных выше требований. Именно этот привод и используется в отечественных универсальных машинах.

Следует отметить, что бесступенчатое регулирование требуется лишь для универсальных машин. Специализированные машины одноцелевого назначения (например, шприц-машины протекторных агрегатов) могут иметь лишь одну или две частоты вращения, согласованные с производительностью всего агрегата в целом. В этом случае оправдано использование двигателей переменного тока.

4.14. БУНКЕРЫ, ПИТАТЕЛИ

Наряду с постоянством частоты вращения червяка, постоянством температур цилиндра и головки равномерность подачи материала в загрузочное окно цилиндра является непременным условием отсутствия пульсаций производительности экструдера. Для обеспечения непрерывной подачи материала червячные машины оснащаются загрузочными и питающими устройствами, расположенными непосредственно над загрузочным окном. Конструкция их существенно зависит от состояния загружаемого материала. Они могут быть разделены на следующие четыре группы: 1) для хорошо сыпучих гранулированных материалов; 2) для плохо сыпучих гранулированных и порошкообразных материалов; 3) для материалов, подаваемых в виде бесформенной, плохо дозируемой массы; 4) для жидких компонентов приготавливаемых в машине смесей.

Первая группа наиболее проста по конструкции. Это укрепленные над загрузочным окном бункеры, как правило, конической формы. Объем бункера рассчитывается таким образом, чтобы одного заполнения хватало по крайней мере на 0,75—2 ч работы машины. Обычно этот объем составляет от 10 л у лабораторных машин до 250 л у крупных экструдеров. Бункер оснащается смотровым окном для контроля уровня материала и задвижкой в нижней части его для прекращения подачи материала в случае необходимости. Для быстрого и удобного полного опорожнения бункера при смене марки материала он часто делается быстросъемным или оснащается разгрузочным патрубком с дополнительной задвижкой. Материал из бункера свободно просыпается, полностью заполняя загрузочное окно и объем захватывающего витка червяка.

Вторая группа — это те же бункеры, дополнительно оснащенные ворошителями и питателями. Первые разрушают своды материала в бункерах, предотвращая тем самым его зависание; вторые обеспечивают равномерную подачу в загрузочное окно с заданной (часто с регулируемой) производительностью.

На рис. 4.40 показан бункер *1*, оснащенный дисковым питателем *7* и ворошителем *5*, имеющими общий привод *3*. Приводом является мотор-редуктор с постоянной частотой вращения. Под воздействием пальцев *4* ворошителя материал свободно просыпается вниз, скребком *6* ворошителя распределяется по периферии диска *7* и непрерывно просыпается через кольцевую щель, образованную диском и подвижным регулировочным стаканом *9*. Высота щели и, следовательно, производительность питателя регулируются опусканием или поднятием стакана с помощью регулировочных винтов *8*.

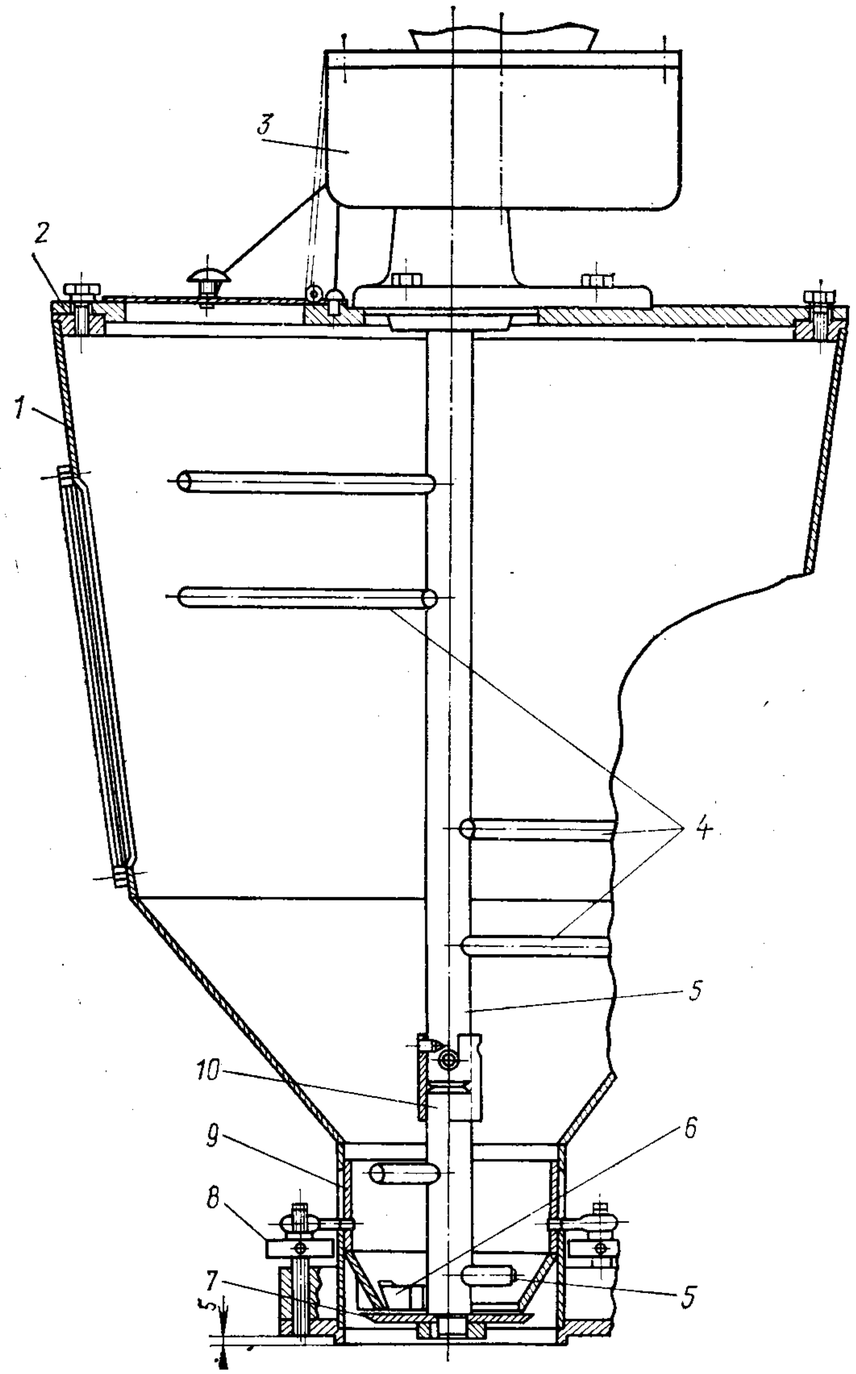


Рис. 4.40. Бункер с тарельчатым питателем и ворошителем:
1 — бункер; *2* — крышка; *3* — привод; *4* — пальцы ворошителя; *5* — ворошитель; *5* — скребок; *7* — дисковый питатель; *8* — регулировочный винт; *9* — регулировочный стакан; *10* — концевая часть ворошителя.

Массовая производительность питателя может быть определена по формуле

$$Q = \frac{\pi h^2 \rho_н}{\operatorname{tg}\alpha} N \left(\frac{D}{2} + \frac{h}{3 \operatorname{tg}\alpha} \right) \qquad (4.137)$$

где h — высота зазора между стаканом и диском; $\rho_н$ — насыпная плотность материала; α — угол естественного откоса материала; N — частота вращения диска; D — выходной диаметр стакана.

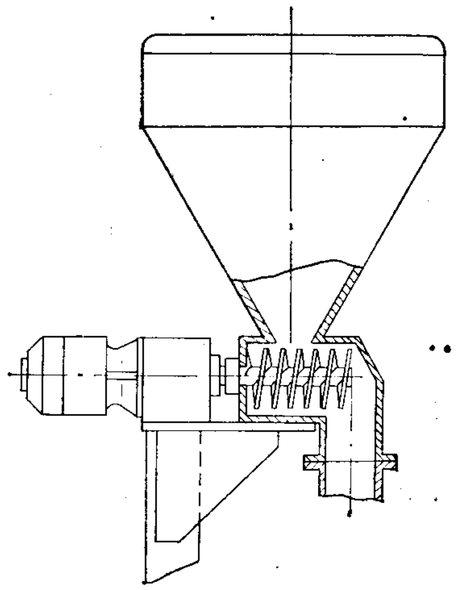


Рис. 4.41. Червячный питатель с горизонтальным расположением червяка.

Если материал недостаточно сыпуч и забивает щель питателя, вместо концевой части ворошителя *10* и диска может монтироваться транспортирующий червяк, своим концом внедряющийся в загрузочное окно. В этом случае он выполняет функцию питателя. Его производительность может регулироваться изменением частоты вращения. Привод этих питателей оснащается поэтому двигателями постоянного тока с регулируемой частотой вращения. Питатели могут также выполняться с горизонтальным расположением червяка (рис. 4.41).

Если материал (порошкообразный или гранулированный) состоит из частиц приблизительно одинаковых размера и плотности, то могут использоваться и вибропитатели (рис. 4.42). Материал из нижней горловины бункера *1*, которая находится на расстоянии 10—40 мм от дна лотка *6*, просыпается в него, образуя конус. Если лотку придать возвратно-поступательное движение (вибрации) в горизонтальной плоскости, то при небольшом наклоне лотка влево материал начнет смещаться по лотку в

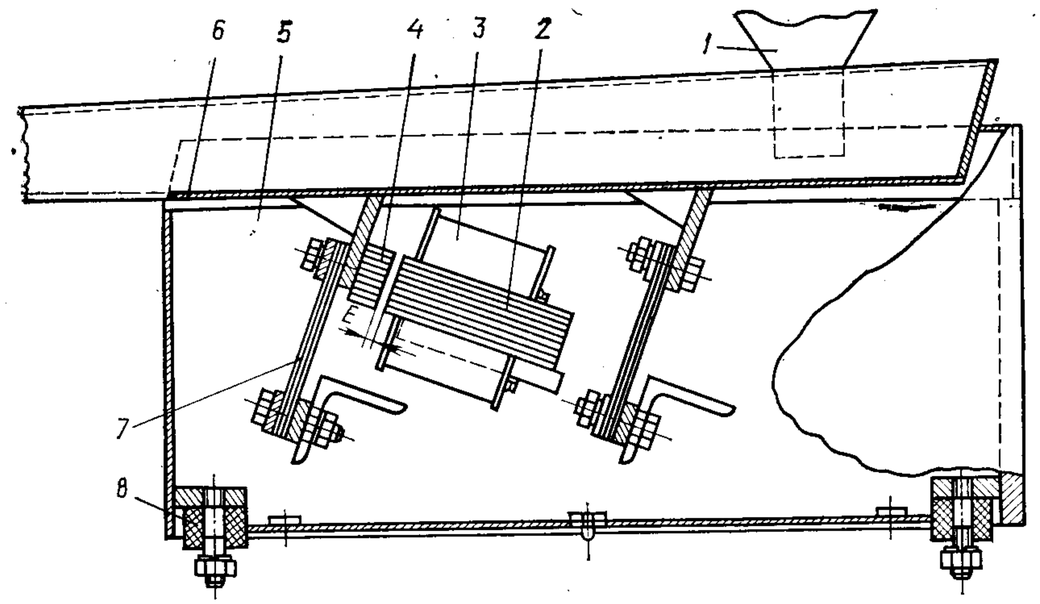


Рис. 4.42. Вибрационный питатель:
1 — бункер; *2* — сердечник электромагнита; *3* — катушка электромагнита; *4* — якорь; *5* — корпус; *6* — лоток; *7* — пластинчатые пружины; *8* — амортизаторы.

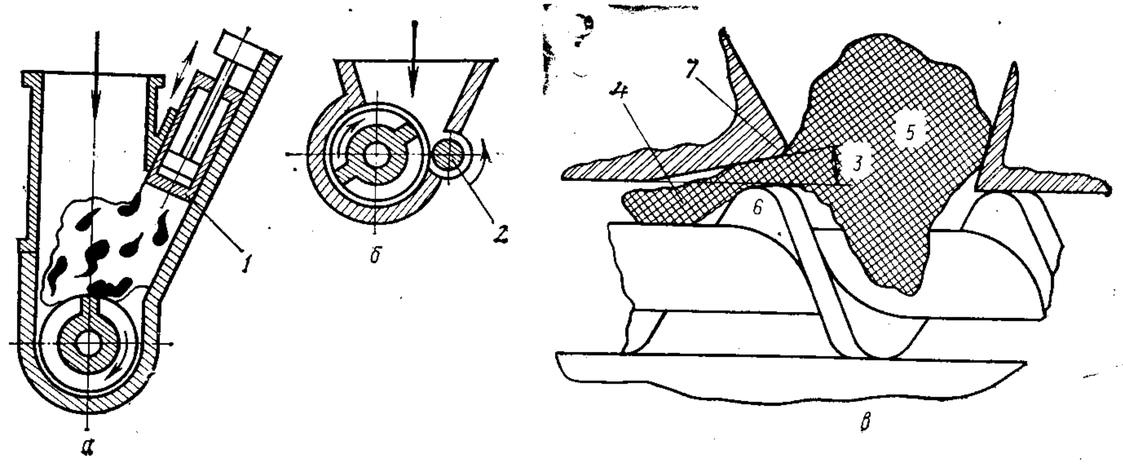


Рис. 4.43. Загрузочные устройства червячных машин для резиновых смесей. Пояснения в тексте.

этом направлении, а его место будет занимать материал, вновь просыпающийся из бункера.

Вибрационное движение лотку сообщается электромагнитом, сердечник которого *2* с катушкой *3* укреплены на боковых стенках корпуса *5*, а якорь *4* — на лотке *6*. Упругая подвеска лотка к корпусу на двух пластинчатых пружинах *7* допускает вибрации его в горизонтальной плоскости. Амортизаторы *8* поглощают неизбежную вибрацию корпуса *5*, предотвращая распространение ее на экструдер. Производительность регулируется изменением высоты горловины над лотком h и амплитуды лотка S; она может быть рассчитана по формуле

$$Q = 0{,}66BhS\eta\rho_н N \qquad (4.138)$$

где B — ширина лотка; η — коэффициент разрыхления материала, равный 0,5—0,7; $\rho_н$ — насыпная плотность материала; N — частота колебаний.

Бункера с питателями могут быть использованы также и для хорошо сыпучих материалов, если требуется подавать материал в канал червяка таким образом, чтобы он заполнял лишь часть его объема, причем не произвольную, а строго заданную (это нужно, например, при питании двухчервячных машин).

Третья группа устройств предназначена для питания машин резиновой смесью, в виде бесформенной «куклы» (выходящей, например, из резиносмесителя), обрезками и отходами пленки, идущей на вторичную переработку, материалами с длинноволокнистым наполнителем в виде плохо раздирающейся путанки и др. (рис. 4.43). Эти устройства имеют широкие и относительно короткие воронки, в которых материал уплотняется и принудительно подается к червяку периодически опускающимся поршнем *1*, имеющим пневмопривод (рис. 4.43, *а*). Для лучшего захвата этих материалов червяком в непосредственной близости от него могут монтироваться один или два принудительно приводимых во вращение валка *2* (см. рис. 4.43, *б*). Цилиндр у захватывающего витка может иметь клиновидный зазор *3*, предотвращающий срез порции материала *4* витком нарезки от основной массы его *5*, который может происходить при набегании гребня *6* на уступ *7*, если этого зазора нет (рис. 4.43, *в*).

Четвертая группа устройств — это чаще всего трубопроводы, по которым насосами подаются жидкие агенты. Трубопроводы соединены с штуцерами, вводящими жидкость в цилиндр на расстоянии 1—2,5 шага нарезки червяка от загрузочного окна.

4.15. ДВУХЧЕРВЯЧНЫЕ МАШИНЫ

4.15.1. Принцип действия и применение

Рабочими органами двухчервячной машины (рис. 4.44) являются цилиндр *1*, имеющий два цилиндрических канала с параллельными осями, в которых размещены червяки *2* и *3*, находящиеся во взаимном зацеплении (рис. 4.44, *а*). Принципиальным отличием от одночервячных машин является то, что винтовой канал каждого из червяков оказывается разделенным на цепочку практически изолированных друг от друга С-образных объемов. Материал попадает из загрузочной воронки в такой объем, например в объем *4*, показанный отдельно на рис. 4.44, *б*

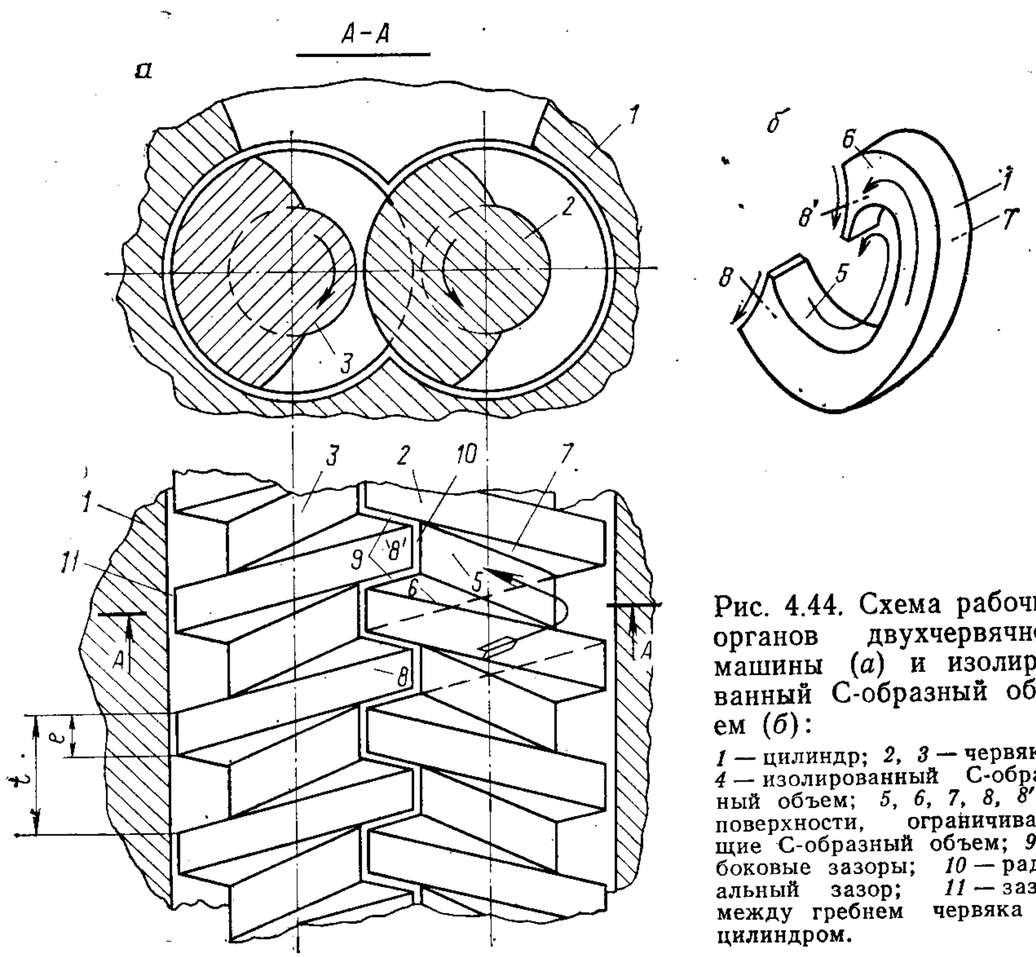


Рис. 4.44. Схема рабочих органов двухчервячной машины (*а*) и изолированный С-образный объем (*б*):

1 — цилиндр; *2*, *3* — червяки; *4* — изолированный С-образный объем; *5*, *6*, *7*, *8*, *8'* — поверхности, ограничивающие С-образный объем; *9* — боковые зазоры; *10* — радиальный зазор; *11* — зазор между гребнем червяка и цилиндром.

(см. также рис. 4.44, *а*), образованный поверхностью цилиндра *1*, поверхностями *5*, *6* и *7* сердечника и боковых стенок нарезки вращающегося червяка *2*, а также цилиндрическими поверхностями *8* и *8′* гребня нарезки другого червяка *3*, вращающегося в противоположную сторону. Если боковые *9* и радиальные *10* зазоры между нарезками червяков минимальны, то материал, попав в эту С-образную секцию, транспортируется при вращении червяков, все время оставаясь в ней; перетекание в соседние секции через указанные зазоры и зазор *11* между гребнем и цилиндром минимально. Таким образом, за один оборот червяков в головку из цилиндра подается независимо от давления в ней объем расплава, равный двум объемам С-образной секции; неконтролируемые пульсации давления практически не оказывают влияния на производительность машины.

В одночервячных же машинах винтовой канал нарезки не имеет никаких конструктивных элементов, принудительно проталкивающих материал вдоль по нему. Движение по каналу в зоне питания обусловлено лишь силами трения между рабочими органами и материалом. При этом возможно практически полное прекращение движения, если сила сопротивления (давление на выходе из зоны) велика или движущая сила (сила трения материала о цилиндр) мала. Сила трения может быть очень малой в двух случаях: если материал очень рыхлый и, несмотря на некоторое уплотнение его в канале, сила прижатия его к стенкам канала невелика; если коэффициент трения в паре материал — металл цилиндра мал.

Именно эти случаи имеют место при экструзии рыхлых порошкообразных полимеров или при гомогенизации с последующей грануляцией порошкообразных полимеров, предварительно в холодном состоянии смешанных со стабилизаторами, пластификаторами и другими веществами, образующими тонкий смазочный слой между частицами порошка и цилиндром.

Есть еще одна особенность работы двухчервячных машин. Жесткость напорно-расходовой характеристики одночервячных машин сильно уменьшается с ростом глубины канала (см. формулы для определения производительности зон питания и дозирования), поэтому канал выполняется мелким. Производительность же мелких червяков относительно невелика. У двухчервячных машин жесткость характеристики не зависит от глубины канала, поэтому в целях увеличения производительности канал выполняют максимально глубоким. Теплогенерация за счет работы деформирования, пропорциональная квадрату скорости сдвига, во много раз меньше в глубоких каналах. По этой причине прогрев в двухчервячных машинах осуществляется преимущественно за счет теплообмена с горячей стенкой цилиндра. Температура материала не превышает температуры цилиндра, управление же последней не составляет труда.

Практически полное выдавливание расплава из С-образных секций в головку обеспечивает равенство времен пребывания

в нагретом цилиндре всех материальных частиц потока. Этого нельзя сказать об одночервячных машинах, спектр времен пребывания материала в которых очень широк.

Таким образом, при переработке на двухчервячных машинах возможен точный, надежный контроль за максимальной температурой и временем воздействия ее на полимер; это особенно важно при переработке полимеров с низкой термостабильностью.

Из рассмотренного очевидны следующие области эффективного применения двухчервячных машин: экструзия высоковязких нетермостабильных материалов (например, непластифицированного поливинилхлорида); экструзия рыхлых порошкообразных материалов; гомогенизация предварительно смешанных композиций на основе порошковых полимеров; переработка материалов, подаваемых в машину в состоянии расплава; экструзия особо точных изделий.

4.15.2. Классификация

По направлению вращения червяков машины делятся на следующие группы (рис. 4.45): с противоположным встречным вращением (4.45, *а*); с противоположным обратным вращением (4.45, *б*); с вращением в одну сторону (4.45, *в*, *г*).

Наилучший захват материала червяками у загрузочного окна — у группы (4.45, *в*) наихудший — при одностороннем вращении по варианту, показанному на рис. 4.45, *б*. Вариант 4.45, *г* лишен недостатка, присущего 4.45, *б*.

Основное различие между встречно-вращающимися и односторонне вращающимися червяками заключается в поведении материала в зазорах *9* и *10* (см. рис. 4.44, *а*). При встречном вращении скорости поверхностей нарезки одного из червяков относительно соответствующих поверхностей нарезки другого червяка в области этих зазоров практически равны нулю. При одностороннем же вращении эти относительные скорости приблизительно равны удвоенной окружной скорости червяка. В последнем случае материал в зазорах подвергается интенсивному сдвигу. За счет этого повышается общая эффективность смешения, однако возрастают диссипативные тепловыделения.

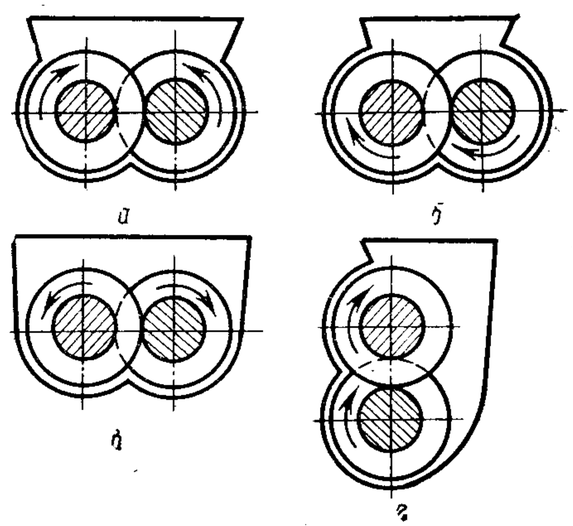


Рис. 4.45. Различные варианты относительного вращения червяков: *а* — противоположное встречное; *б*, *г* — одностороннее; *в* — противоположное обратное.

По профилю сечения нарезки червяки делятся на группы: с трапецеидальной нарезкой (см. рис. 4.44); с прямоугольной нарезкой. С точки зрения характера обработки материала эти группы принципиальных различий не имеют.

По конструктивным приемам, обеспечивающим степень сжатия, червяки делятся на группы: с монотонно уменьшающимся шагом, со ступенчато уменьшающимся шагом; с монотонно возрастающей шириной гребня нарезки; конические червяки.

Уплотнение материала, его монолитизация и удаление воздуха в одночервячных машинах осуществляются за счет монотонного уменьшения расхода материала вдоль канала по мере продвижения по нему. В двухчервячных машинах этот способ уплотнения невозможен: рыхлый материал, попав в замкнутую секцию, не уменьшит своего объема и не уплотнится по мере движения в секции, если объем секции будет оставаться постоянным. Если же материал не уплотнится, то прогрев, плавление материала и смешение расплава не будут протекать эффективно. Кроме того, поступающий в головку расплав будет иметь воздушные включения.

Единственный путь уплотнения материала — уменьшение объема С-образных секций по направлению к выходу из цилиндра. Как правило, степень уменьшения объема С-образных секций (степень сжатия) составляет 3—4. Перечисленные выше способы уменьшения объема иллюстрированы на рис. 4.46.

Если материал при уплотнении способен уменьшаться в объеме в 2 раза, а для его переработки используются червяки

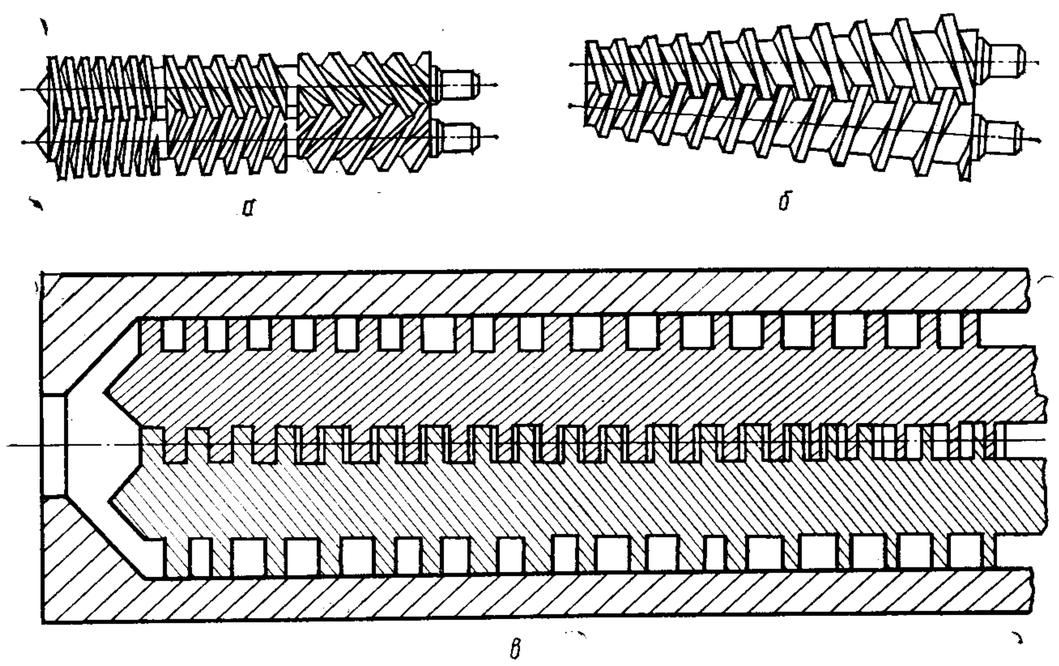
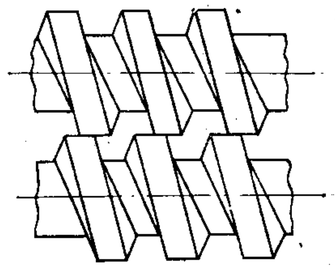


Рис. 4.46. Способы создания степени сжатия канала червяков:
а — переменный шаг нарезки; *б* — конические червяки; *в* — возрастающая ширина гребня нарезки.

Рис. 4.47. Незацепляющиеся червяки.



со степенью сжатия 4, то практически половина из вошедшего в канал червяка и монолитизированного материала не сможет поместиться в С-образных секциях на выходном конце червяка. Это приведет к заклиниванию еще не расплавленного переуплотненного материала между цилиндром и червяками и остановке вращения последних. Избежать этого можно, если материал, просыпающийся из загрузочного окна в С-образную секцию, будет занимать не более половины ее объема. Чем ближе возможная степень уплотнения материала к степени сжатия червяков, тем бóльшая доля объема секции может быть заполнена у загрузочного окна. Таким образом, необходимо дозированное регулируемое питание загрузочного окна материалом.

Дозирование осуществляют питателями-дозаторами, конструкции которых описаны в разд. 4.14. Однако если в экструдере выполняется операция смешения и гомогенизации, то устанавливают подачу материала в окно на 5—7% бóльшую, чем требуемая по отмеченному выше объемному соотношению. Некоторый избыток материала в секциях приводит при этом к интенсивным перетокам через зазоры *9* и *10* (см. рис. 4.44) в предшествующие и последующие С-образные секции. За время пребывания в зазорах материал подвергается сдвиговому деформированию и смешению. Оптимальным является такой режим загрузки материала, при котором каждая материальная частица хотя бы один раз побывает в зазоре. Для облегчения перетоков (во избежание упомянутого уже заклинивания) зазоры *9* и *10* (см. рис. 4.44) во всех витках, кроме двух-четырех последних, значительно увеличивают.

Чем меньше степень зацепления червяков, тем больше перетоки, тем лучше смесительное воздействие. *Степень зацепления* — один из параметров, по которым классифицируют двух- и многочервячные машины. Крайний вариант — это не зацепляющиеся червяки (рис. 4.47); по виду напорно-расходовой характеристики и характеру процессов, протекающих в каналах червяков, работа этого типа двухчервячного экструдера подобна работе двух одночервячных, присоединенных к одной головке со всеми их недостатками.

4.15.3. Конструкции червяков

Конструкции червяков червячных смесителей чрезвычайно разнообразны. На рис. 4.48 показаны червяки машины для смешения, гомогенизации и грануляции композиций на основе термопластов. Рабочая часть червяков образована сменными

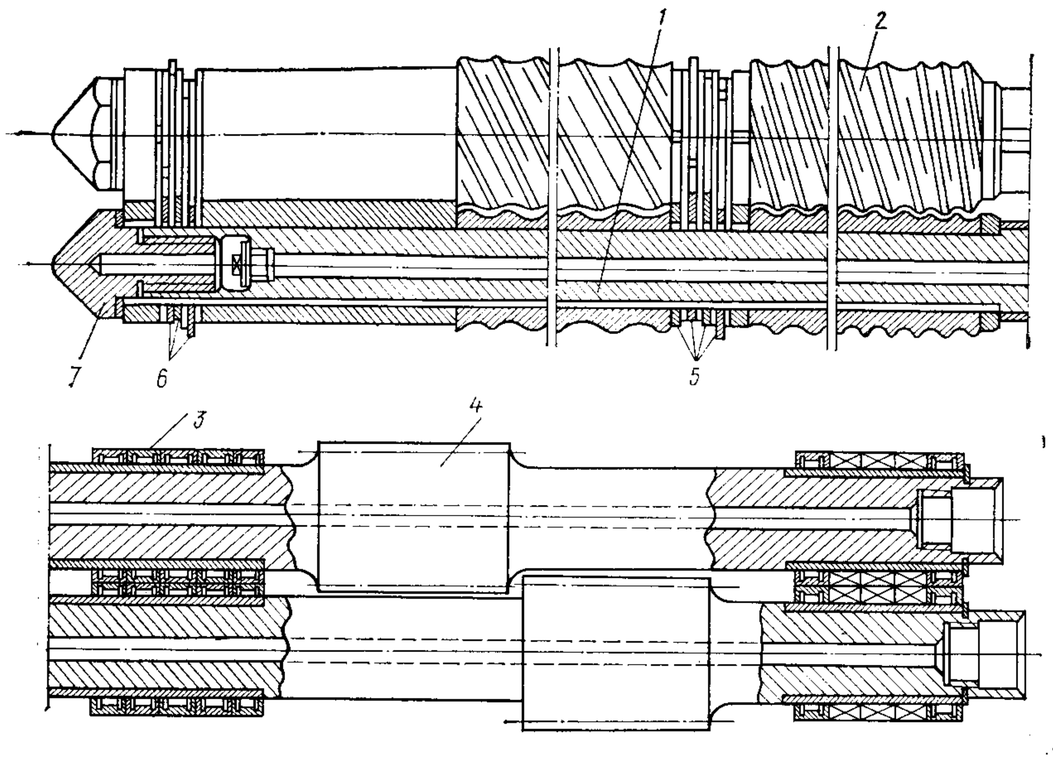


Рис. 4.48. Составные червяки двухчервячного гранулятора:
1 — сердечник; *2* — рабочие втулки; *7* — наконечник; *5*, *6* — смесительные кулачки; *3* — игольчатый подшипник; *4* — приводная шестерня.

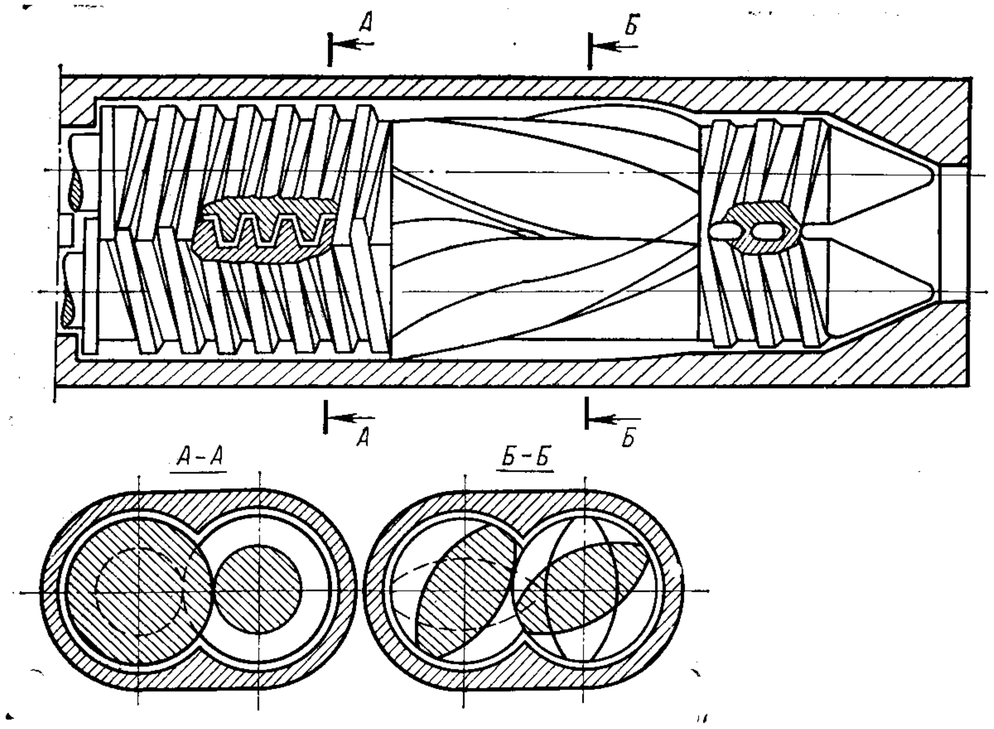


Рис. 4.49. Смеситель для резиновых смесей.

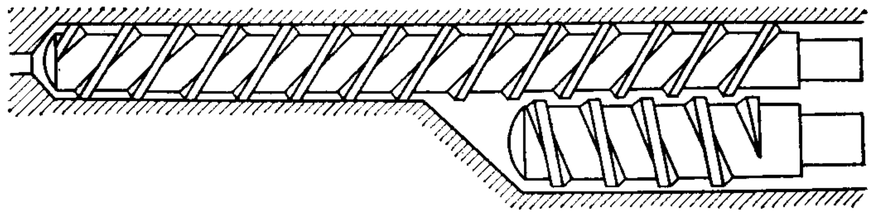


Рис. 4.50. Одночервячный пластикатор с дополнительным червяком в зоне питания.

втулками *2*, надетыми на сердечники *1* на скользящих шпонках. В середине и в конце рабочей части червяков между втулками установлены смесительные кулачки *5*, *6*.

Рабочие органы машины типа резиносмесителя непрерывного действия показаны на рис. 4.49. Взаимнозацепляющиеся в зоне загрузки червяки обеспечивают надежное непрерывное питание. В средней части червяки выполнены в виде роторов резиносмесителя. В выходной части червяки не зацепляются. Эта часть выполняет функции завершающей стадии смешения и выдавливания через головку.

Часто второй червяк (зацепляющийся или не зацепляющийся) выполняют очень коротким, преследуя при этом лишь одну, но очень важную цель: обеспечить надежное стабильное питание одночервячного рабочего органа рыхлыми порошковыми материалами (рис. 4.50).

4.15.4. Производительность и мощность привода

Производительность двухчервячных машин с зацепляющимися червяками может быть определена по формуле

$$Q = 2lv_в N \qquad (4.139)$$

где l — заходность винтовой нарезки; $v_в$ — объем С-образной секции канала у последнего витка нарезки; N — частота вращения червяков.

Объем С-образной секции $v_в$ (рис. 4.51) равен площади кольца $s_к$ с внутренним и наружным диаметрами d и D соответственно (за вычетом заштрихованной площади $s_с$, равной удвоенной площади сегмента amb), умноженной на ширину канала B:

$$v_в = (s_к - s_с)\, B/\cos\varphi \qquad (4.140)$$

Сомножитель $1/\cos\varphi$, где φ —угол подъема винтовой нарезки (см. рис. 4.50), учитывает, что площадки $s_к$ и $s_с$ реально не лежат в плоскости чертежа, но представляют собой участки винтовой поверхности.

Выражение для входящей в формулу (4.140) величины $s_к$ очевидно:

$$s_к = \pi (D^2 - d^2)/4 = \pi H (D - H) \qquad (4.141)$$

Выражение для s_c имеет вид

$$s_c = 2\,(s_{oamb} - s_{oab}) \qquad (4.142)$$

Здесь s_{oamb} и s_{oab} — площадь сектора *oamb* и площадь треугольника *oab* соответственно, причем

$$s_{oamb} = (\pi D^2/4)\,(\alpha/2\pi) = D^2\alpha/8; \qquad s_{oab} = 0{,}5oc \cdot ab \qquad (4.143)$$

Выражения для *oc* и *ab* очевидны из рис. 4.51:

$$oc = D/2 - H/2; \qquad ab = 2cb = 2ob \sin(\alpha/2) = D \sin(\alpha/2) \qquad (4.144)$$

Ширина канала B (см. рис. 4.50) равна

$$B = (t - e)\cos\varphi \qquad (4.145)$$

где $t = \pi D \operatorname{tg}\varphi$ — шаг нарезки; e — ширина гребня нарезки.

С учетом выражений (4.141)—(4.145) формула для производительности Q принимает следующий вид:

$$Q = 2Nl\left\{\pi H(D-H) - \frac{D}{2}\left[D\frac{\alpha}{2} - (D-H)\sin\frac{\alpha}{2}\right]\right\}\frac{B}{\cos\varphi} \qquad (4.146)$$

Угол сопряжения червяков α может быть определен из соотношения, очевидного из рис. 4.51:

$$\cos\alpha = oc/ob = (D-H)/(2D) \qquad (4.147)$$

Подобным же образом может быть получена формула производительности для червяков с прямоугольной нарезкой.

Если червяки незацепляющиеся, то кинематика движения материала в их каналах подобна таковой для одночервячных машин. Производительность в этом случае может рассчитываться как удвоенная производительность одночервячной машины.

Начальные стадии процесса плавления гранулированных термопластов в С-образных секциях протекают так же, как и в одночервячных машинах. Твердый гранулят плавится на поверхности контакта с обогреваемым цилиндром и скапливается у задней (ближней к загрузочному окну) стенки *7* канала (см. рис. 4.44). Однако принудительное прижатие области твердого полимера к стенке цилиндра практически отсутствует, так как у всех червяков с постоянным диаметром глубина канала также постоянна. По этой причине пленочный режим плавления вырождается гораздо быстрее, чем в одночервячных машинах: твердая область разрушается и смешивается с образовавшимся расплавом. При таком сложном, беспорядочном состоянии материала в канале расчет рассеиваемой в нем мощности W_1 затруднителен. Это

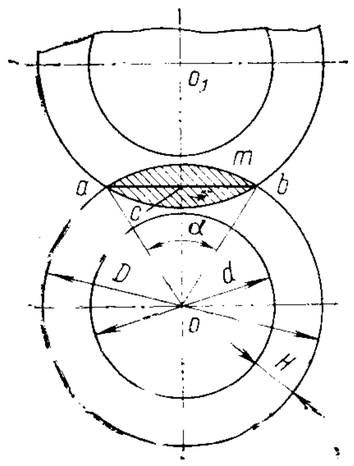


Рис. 4.51. К расчету объема С-образной секции канала червяка.

возможно только для тех последних витков, в которых материал уже полностью перешел в расплав.

Формулы (4.58), (4.59), являющиеся исходными при выводе выражения для расчета мощности W_1, рассеиваемой в С-образной секции, справедливы и в данном случае. Аналогичны также формула для производной $(v_x)'_y|_{y=H}$ (4.60а) и формула для продольной компоненты скорости $v_z(y)$ (4.35). Однако в отличие от одночервячной машины С-образная секция канала практически замкнута; расход из нее, если пренебречь утечками через зазоры, равен нулю, что дает право записать:

$$\int_0^H v_z(y)\,dy = 0 \qquad (4.148)$$

Вводя (4.35) в (4.148), получаем выражения для $v_z(y)$ и для $(v_z)'_y|_{y=H}$:

$$\text{а)}\ v_z(y) = V_z\frac{y}{H}\left(3\frac{y}{H} - 2\right); \qquad \text{б)}\ \left.\frac{dv_z}{dy}\right|_{y=H} = \frac{4V_z}{H} \qquad (4.149)$$

Вводя в формулу (4.58) выражения (4.59), (4.60а) и (4.149б), а также выполняя интегрирование на интервале, равном длине С-образной секции $(2\pi - \alpha)\,[D/(2\cos\varphi)]$, измеренной по наружному диаметру червяка D, получаем:

$$W_1 = (4\eta/H)\,(V_x^2 + V_z^2)\,B\,(2\pi - \alpha)\,D/(2\cos\varphi) \qquad (4.150)$$

где

$$\eta = m_0 \exp[E/(RT)]\,(V/H)^{n-1}$$

Для двухчервячных машин, в отличие от одночервячных, эта составляющая вносит гораздо меньший вклад в общие затраты мощности. Основной вклад — мощность W_2, расходуемая на сдвиговое деформирование материала в зазоре между гребнями нарезки и стенками цилиндра. Причина этого — гораздо большая площадь поверхности гребней у зацепляющихся червяков не только с прямоугольной, но и с трапецеидальной нарезкой. Формула для расчета W_2, приходящейся на гребень одной С-образной секции, полученная подобно формуле (4.66), имеет следующий вид:

$$W_2 = V\,(V/\Delta)^n m_0 \exp[E/(RT_ц)]\,eB\,(2\pi - \alpha)\,(D/2) \qquad (4.151)$$

Если червяки вращаются с одинаковой угловой скоростью, то окружные скорости рабочих поверхностей нарезок в области боковых зазоров *9* (см. рис. 4.44) взаимно противоположны по направлению, затраты мощности на сдвиговое деформирование материала в этих зазорах по этой причине велики и должны учитываться.

Мощность W_3, затрачиваемая на деформирование материала в одном боковом зазоре, равна

$$W_3 = FV_{отн} \qquad (4.152)$$

Здесь F — окружная сила, а $V_{отн}$ — средняя относительная скорость соседних боковых поверхностей нарезок червяков:

$$V_{отн} = 2\omega R_{ср} \qquad (4.153)$$

где $R_{ср} = (D - H)/2$.

Выражение для окружной силы F имеет вид:

$$F = \tau s_c \qquad (4.154)$$

где $\tau = \eta\dot{\gamma} = \eta V_{отн}/\Delta$ [здесь η — вязкость расплава, определяемая в данном случае по формуле (4.65); Δ — величина бокового зазора].

Вводя (4.65), (4.153) и (4.154) в (4.152), получаем формулу для мощности W_3:

$$W_3 = \omega (D - H) [\omega (D - H)/\Delta]^n m_0 \exp [E/(RT_ц)] s_c \qquad (4.155)$$

В этой формуле приближенно принято, что температура материала в зазоре равна температуре цилиндра.

Полная мощность W, затрачиваемая на вращение обоих червяков, равна

$$W = 2j (W_1 + W_2 + W_3) \qquad (4.156)$$

где j — число шагов нарезки рабочей части червяка.

Следует также отметить, что в формуле (4.150) температура материала в С-образной секции T существенно различна для различных секций по длине червяка. Точный вид распределения температуры T по длине червяка установить трудно из-за сложности процесса плавления в секции. Однако, учитывая, что величина W_1 вносит относительно малый вклад в W, с допустимой степенью приближения температуру T в (4.150) можно принимать постоянной и равной $T_ц$.

Если направление вращения червяков противоположное, то средняя относительная скорость поверхностей нарезок червяков в боковом зазоре равна нулю, и составляющая мощности W_3 также практически равна нулю.

Для машин с незацепляющимися червяками расчет мощности можно приближенно выполнять так же, как и для одночервячных машин.

4.15.5. Конструкции радиальных и упорных подшипников

Основная сложность конструирования подшипниковых узлов для шпинделей (сердечников) привода червяков обусловлена тем, что расстояние между осями шпинделей OO_1 (см. рис. 4.50) не может быть больше диаметра червяка D для незацепляющихся червяков и $(D—H)$ — для зацепляющихся червяков. Пространство между сердечниками оказывается столь мало, что в качестве радиальных в него могут вписаться только игольчатые многорядные подшипники *3* (см. рис. 4.48). При размещении упорных подшипников возникают еще бóльшие

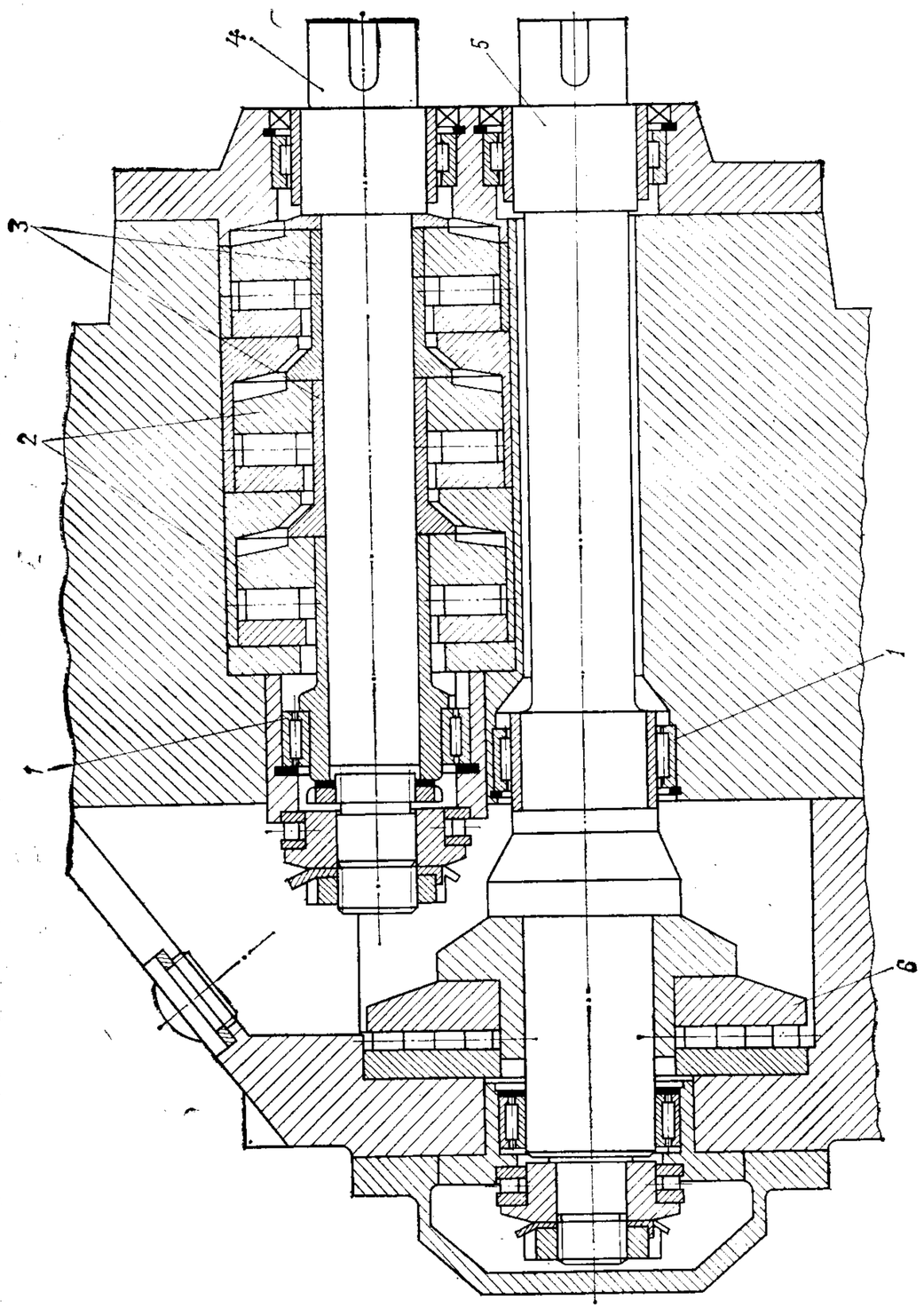


Рис. 4.52. Узел упорных подшипников двухчервячной машины:
1 — игольчатый радиальный подшипник; *2* — упорные однорядные подшипники; *3* — дистанционные втулки; *4*, *5* — шпиндели; *6* — упорный многорядный подшипник.

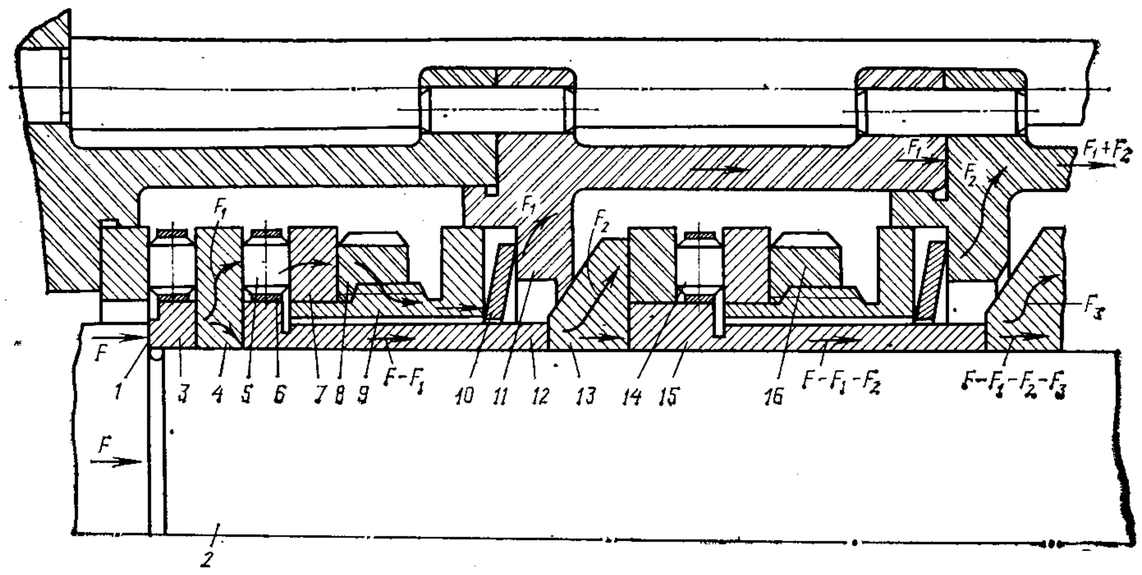


Рис. 4.53. Многорядный узел упорных подшипников с регулированием распределения усилия между подшипниками:

1 — опорный бурт шпинделя; *2* — шпиндель; *3* — втулка; *4, 7* — кольца упорного подшипника; *5, 14* — ролики упорных подшипников; *6* — сепаратор роликов; *8, 16* — регулировочные гайки; *9* — регулировочная втулка; *10* — тарельчатая пружина; *11* — секция корпуса подшипников; *12, 15* — дистанционные втулки; *13* — упорное кольцо.

сложности. На рис. 4.52 видно, какие габариты должен иметь упорный многорядный подшипник *6*, для того чтобы быть способным воспринимать осевое усилие, передаваемое на него с вращающегося шпинделя *5*. Совершенно очевидно, что такой же второй подшипник разместить на другом шпинделе невозможно не только напротив первого (т. е. так, как расположены радиальные игольчатые подшипники *1*), но даже и со смещением по оси шпинделя. Единственно возможным вариантом оказывается установка смещенных относительно первого нескольких однорядных подшипников *2*, работающих параллельно.

Каждый из трех упорных подшипников на шпинделе *4* должен воспринимать одинаковое усилие, равное одной трети осевого усилия на этом шпинделе. Добиться однородного распределения усилия по подшипникам можно, правильно выбрав длину передающих усилие втулок *3*. Выполнить это можно было бы, если бы в процессе отладки подшипникового узла, заключающейся в многократной прошлифовке втулок по высоте, имелась возможность контроля (измерения) усилия на каждом подшипнике. Такая возможность отсутствует, и это существенный недостаток конструкции.

Отмеченного недостатка лишена конструкция, показанная на рис. 4.53. Осевое усилие F через бурт *1* шпинделя *2* передается втулке *3* и подвижному кольцу упорного подшипника, ролики которого *5* заключены в сепаратор *6*. Затем часть этого усилия F_1 через ролики *5*, неподвижное кольцо *7*, регулировочную гайку *8* с втулкой *9* передается на тарельчатую пружину *10* и с нее — на секцию *11* корпуса узла. Другая часть усилия

($F—F_1$) передается на дистанционную втулку *12* и упорное кольцо *13*; с него доля усилия F_2 передается второму подшипнику *14*, а оставшаяся доля ($F—F_1—F_2$) через вторую дистанционную втулку *15* передается далее.

Равенство составляющих F_i, приходящихся на каждый подшипник, достигается путем регулирования положения гаек *8* и *16*: при отладке узла гайки *8* с помощью ключа с измерителем момента затяжки вращают по втулкам *9*, выбирая осевые зазоры во всех подшипниках и создавая небольшое одинаковое усилие их затяжки.

Все секции корпуса стянуты колонками, на которые и передается осевое усилие.

Несмотря на введение многорядных подшипников условия работы каждого из них напряженные. По этой причине максимальная частота вращения червяков не превышает 40 об/мин.

Как радиальные, так и упорные подшипники смазываются консистентной смазкой, вводимой через шприц-масленки. В машинах больших типоразмеров эти подшипники снабжаются принудительной циркуляционной жидкостной смазкой.

Взаимное расположение радиальных, упорных подшипников и привода червяков показано на рис. 4.54. При одностороннем вращении червяков (рис. 4.54, *а*) шестерни *1* и *2* образуют внут-

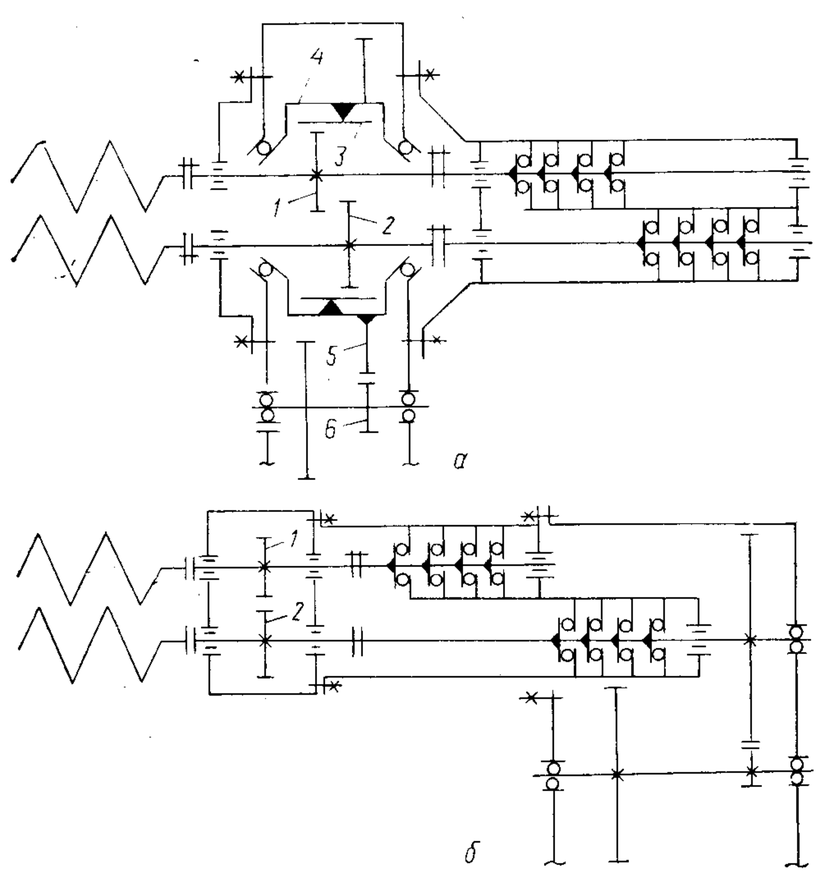


Рис. 4.54. Кинематические схемы привода червяков с односторонним (*а*) и встречным (*б*) вращением.

реннее зацепление с зубчатым колесом *3*, которое укреплено внутри ступицы *4*. Снаружи ступицы укреплено другое зубчатое колесо *5*, образующее с шестерней *6* последнюю ступень редуктора. При встречном вращении червяков (рис. 4.54, *б*) их шестерни *1* и *2* взаимно зацеплены.

4.16. ДИСКОВЫЕ И ЧЕРВЯЧНО-ДИСКОВЫЕ ЭКСТРУДЕРЫ

4.16.1. Принцип действия

Схема дискового экструдера показана на рис. 4.55. Рабочими органами машины являются вращающийся диск *1* и неподвижная деталь *3*, образующие дисковый рабочий зазор *7*. Деталь *3* оснащена электрообогревом *4*. Диск *1* также имеет электрообогрев.

Материал через загрузочную воронку *2* попадает в периферийную область рабочего зазора *7* и вовлекается в круговое движение. Контактируя с горячими рабочими поверхностями и подвергаясь интенсивному сдвигу (частота вращения диска от 200 до 400 об/мин), материал разогревается и плавится. Вследствие проявления расплавом упругих свойств в нем возникают нормальные напряжения, действующие в радиальном направлении. Вследствие этих напряжений в материале наряду с окружной возникает и радиальная компонента скорости, обеспечивающая перемещение его к центральному отверстию *6* в детали *3*. Продавливаясь через каналы формующей головки *5*, расплав выходит из экструдера.

На рис. 4.56 приведена схема, поясняющая механизм возникновения напорного эффекта, обеспечивающего течение расплава в радиальном направлении. Материал подвергается сдвигу в окружном направлении θ. В разд. 1.3.1 отмечалось, что

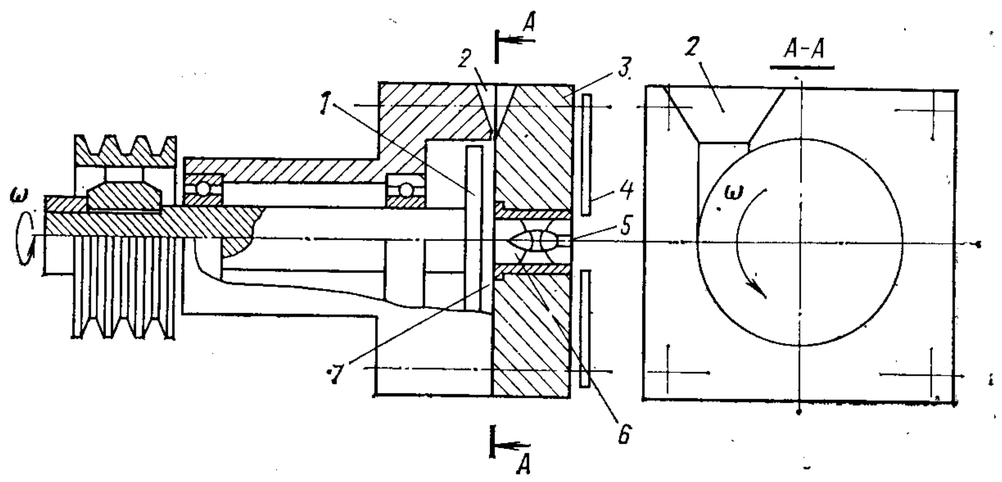


Рис. 4.55. Принципиальная схема дискового экструдера:
1 — диск; *2* — загрузочная воронка; *3* — неподвижная деталь; *4* — электрообогреватель; *5* — каналы формующей головки; *6* — центральное отверстие неподвижной детали; *7* — дисковый рабочий зазор.

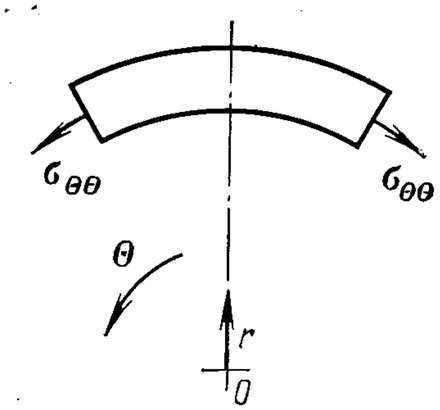


Рис. 4.56. Схема, поясняющая возникновение напорного эффекта в рабочем зазоре экструдера.

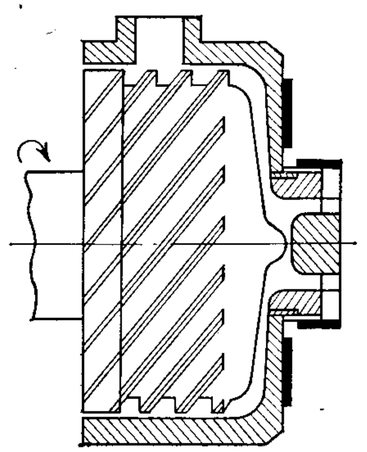


Рис. 4.57. Рабочие органы дискового экструдера с винтовой нарезкой для принудительной подачи материала в зазор между дисками.

в вязкоупругих жидкостях в направлении сдвига возникают нормальные растягивающие напряжения. Эти напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ действуют на выделенный в рабочем зазоре элемент расплава, причем из-за криволинейности направления сдвига проекции $\sigma_{\theta\theta}$ на радиальное направление r не равны нулю и направлены к центру o. Вследствие этого подверженный растяжению элемент оказывает давление на расположенный ближе к центру материал.

Преимущества дисковых экструдеров по сравнению с червячными: они более просты по конструкции, малогабаритны и дешевле червячных; качество смешения в них лучше, так как поле скоростей сдвига в рабочем зазоре (в отличие от поля скоростей сдвига в канале червяка) практически однородно; время пребывания расплава в каналах намного меньше (не превышает 10 с), что важно для нетермостабильных материалов.

Недостатки машин с конструкцией рабочих органов, показанных на рис. 4.55: значительные пульсации производительности из-за отсутствия принудительной стабильной подачи материала в рабочий зазор; малые значения максимального давления, развиваемого на входе в головку, вследствие чего невозможна работа с головками большого гидравлического сопротивления (производство пленок, листов, тонкостенных профилей).

Первый недостаток устраняется тем, что диск выполняют со значительным по длине цилиндрическим участком, имеющим многозаходную винтовую нарезку (рис. 4.57). Работая подобно зоне питания червячных машин, она стабилизирует подачу материала в рабочий зазор.

Второй недостаток устраняют, укрепляя на диске (соосно с ним) червяк, который входит в цилиндр, укрепляемый в этом

случае на детали *3* (см. рис. 4.55). Конфигурация червяка такая же, как и дозирующей зоны пластицирующих червяков (см. разд. 4.11.1). В этом случае зона питания диска с винтовой нарезкой и зона рабочего зазора осуществляют лишь транспортирование и плавление материала. Создание же давления, достаточного для прохождения расплава через каналы головки, осуществляется червяком, выполняющим функции винтового насоса.

4.16.2. Производительность, мощность привода и осевое усилие на диске

Так же как и в червячной машине, стабильная производительность без пульсаций достигается, если производительность каждой последующей зоны равна или несколько меньше транспортирующей способности предыдущей зоны (напомним, что транспортирующая способность — это производительность зоны при перепаде давления по длине ее, равном нулю). Это значит, что транспортирующая способность зоны диска Q_2 должна быть равна или несколько больше производительности Q_3 нагнетающего червяка. Точно так же должно соблюдаться соотношение $Q_1 \geqslant Q_2$, где Q_1 — транспортирующая способность зоны питания со спиральной нарезкой. Геометрия рабочих органов должна выбираться такой, чтобы эти соотношения соблюдались.

При проверке выполнимости указанных соотношений расчет Q_3 может проводиться без каких-либо изменений по формуле (4.36). Величина Q_1 может рассчитываться по формулам (4.21) и (4.22), причем значение угла транспортирования α должно определяться из уравнения (4.17а) при условии $F_\alpha = 0$, соответствующем отсутствию перепада давления по длине зоны [см. формулу (4.20) для F_α]. Расчет транспортирующей способности зоны диска Q_2 приводится ниже.

На рис. 4.58 представлен характер напряженного состояния материала в рабочем зазоре дискового экструдера. На элементарный объем расплава *3* (рис. 4.58, *а*), выделенный в рабочем зазоре между вращающимся *1* и неподвижным *2* дисками, действуют напряжения, показанные на рис. 4.58, *б*. При сдвиговом деформировании расплава вращающимся диском в направлении сдвига (окружном направлении θ) возникают касательные напряжения $\sigma_{\theta z}$. Окружную компоненту скорости сдвига $\dot{\gamma}_{\theta z}$ можно считать практически неизменной в направлении оси z, если течение рассматривать в изотермическом приближении. В соответствии с этим окружное напряжение сдвига $\sigma_{\theta z}$ также не зависит от z. Вследствие проявления расплавом свойств упругости в нем в направлении сдвига θ возникают нормальные напряжения растяжения $\sigma_{\theta\theta}$ (см. разд. 1.3.1), а в двух других направлениях r и z — напряжения сжатия θ_{zz} и σ_{rr}. Из-за возникающего напорного эффекта, о котором упоминалось в предыдущем разделе, напряжения σ_{rr} непостоянны в радиальном направлении. Напорный эффект вызывает течение в радиальном направлении; следствием этого течения являются касательные напряжения σ_{rz}, которые при напорном течении в каналах существенно неоднородны в направлении, перпендикулярном направлению течения (в данном случае — в направлении z).

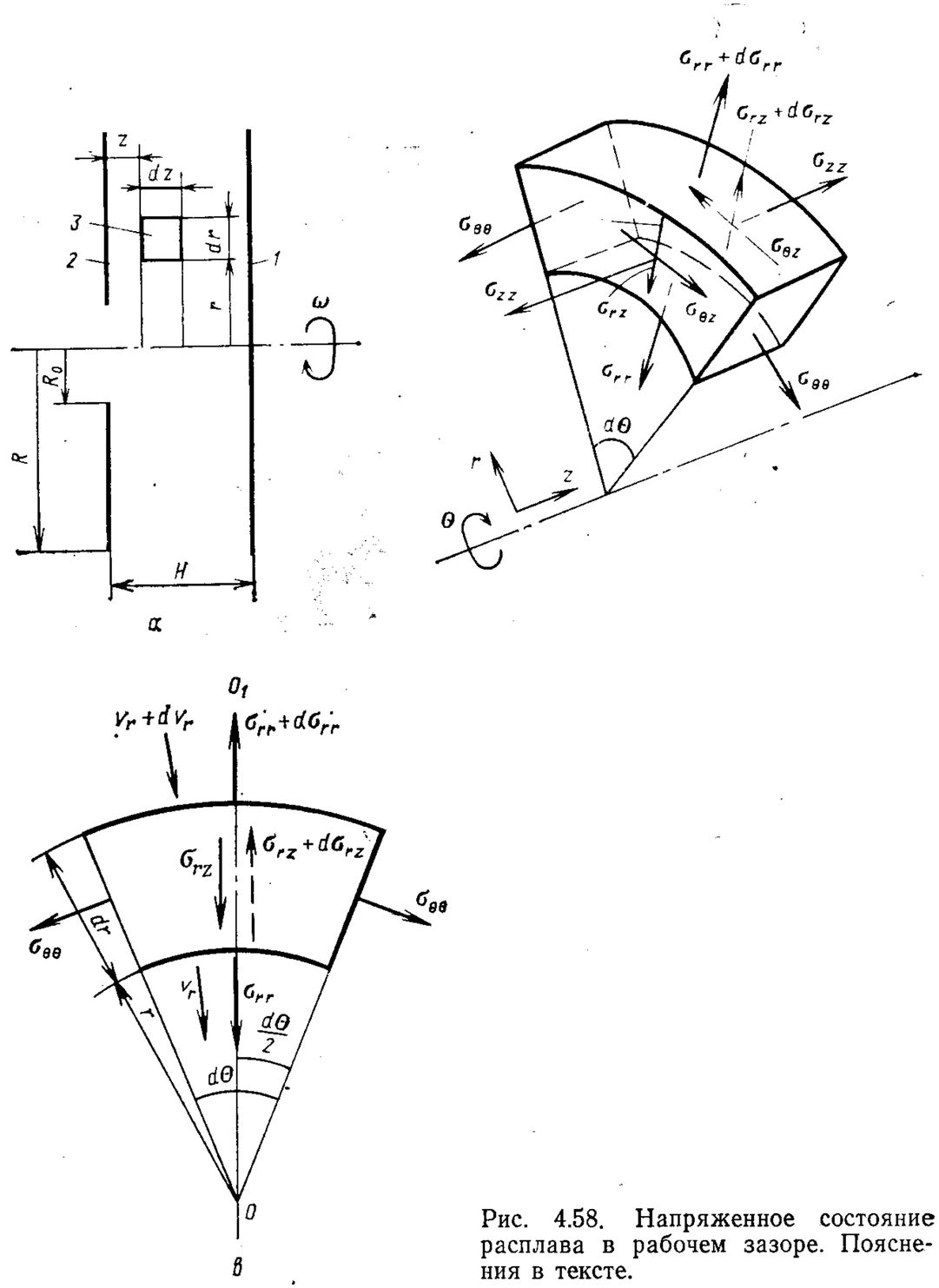


Рис. 4.58. Напряженное состояние расплава в рабочем зазоре. Пояснения в тексте.

На рис. 4.58, *в* показаны те напряжения, проекции которых на радиальное направление OO_1 не равны нулю. При проекти-

ровании их на oo_1 получаем следующее уравнение:

$$-\sigma_{rr} r d\theta dz + (\sigma_{rr} + d\sigma_{rr})(r + dr)\, d\theta dz - 2\sigma_{\theta\theta} dr dz \operatorname{tg}(d\theta/2) - \\ - \sigma_{rz} r d\theta dr + (\sigma_{rz} + d\sigma_{rz})\, r d\theta dr = 0 \qquad (4.157)$$

После преобразований, пренебрегая слагаемыми малого порядка и учитывая приближение $\operatorname{tg}(d\theta/2) \approx d\theta/2$, получаем это уравнение в следующей форме:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} - \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}}{r} + \frac{d\sigma_{rz}}{dz} = 0 \qquad (4.158)$$

Входящая в (4.158) первая разность нормальных напряжений $\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$ зависит от окружной компоненты скорости сдвига $\dot{\gamma}_{\theta z}$ в соответствии с (1.18):

$$\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr} = m_1 \dot{\gamma}_{\theta z}^{n_1} \qquad (4.159)$$

где $\dot{\gamma}_{\theta z} = \omega r/H$.

Касательное же напряжение σ_{rz} связано с компонентой скорости сдвига в радиальном направлении $\dot{\gamma}_{rz} = dv_r/dz$ в соответствии с (4.30) и (4.32):

$$\sigma_{rz} = \eta \dot{\gamma}_{rz} \qquad (4.160)$$

где $\eta = m(T)\, \dot{\gamma}^{n-1}$; $\dot{\gamma}_{rz} = dv_r/dz$.

Здесь $\dot{\gamma}$ есть модуль полного вектора скорости сдвига, равного геометрической сумме обеих компонент $\dot{\gamma}_{\theta z}$ и $\dot{\gamma}_{rz}$. Однако реально при работе дисковых экструдеров величина $\dot{\gamma}_{\theta z}$ намного больше $\dot{\gamma}_{rz}$, так что правомерно приближение $\dot{\gamma} \approx \dot{\gamma}_{\theta z}$, и (4.160) принимает следующий вид:

$$\sigma_{rz} = m \left(\frac{\omega}{H} r\right)^{n-1} \frac{dv_r}{dz} \qquad (4.161)$$

Радиальная скорость v_r зависит как от z, так и от r, причем вид функции $v_z(r)$ устанавливается из условия неразрывности, согласно которому разность расходов до и после выделенного элементарного объема (см. рис. 4.58, *в*) равна нулю:

$$(v_r + dv_r)(r + dr)\, d\theta - v_r r d\theta = 0 \qquad (4.162)$$

Раскрыв скобки, пренебрегая слагаемыми малого порядка и поделив каждое из слагаемых на произведение $r d\theta dr$, получаем

$$v_r/r + dv_r/dr = 0 \qquad (4.163)$$

Разделяя переменные v_r и r и выполняя интегрирование, имеем

$$v_r = c(z)/r \qquad (4.164)$$

где постоянная интегрирования c — функция координаты z.

Выражение (4.161) с учетом (4.164) принимает вид

$$\sigma_{rz} = m \left(\frac{\omega}{H} r\right)^{n-1} \frac{1}{r} \frac{dc(z)}{dz} \qquad (4.165)$$

Если теперь выражения для σ_{rz} — (4.165) и $(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr})$ — (4.159) ввести в уравнение силового баланса, то после элементарных преобразований получим

$$\left[\frac{d\sigma_{rr}}{dr} - m_1 \left(\frac{\omega}{H}\right)^{n_1} r^{n_1 - 1}\right] \frac{1}{r^{n-2}} = -m \left(\frac{\omega}{H}\right)^{n-1} \frac{d^2 c(z)}{dz^2} \qquad (4.166)$$

Видно, что левая часть этого уравнения $f_1(r)$ не зависит от z, а правая часть $f_2(z)$ не зависит от r. Соблюдение равенства $f_1(r)$ и $f_2(z)$ возможно лишь в том случае, если при произвольном изменении независимых переменных r и z эти функции остаются постоянными и равными некоторой величине α. Таким образом, (4.166) представляет собой два уравнения следующего вида:

$$\left[\frac{d\sigma_{rr}}{dr} - m_1 \left(\frac{\omega}{H}\right)^{n_1} r^{n_1 - 1}\right] \frac{1}{r^{n-2}} = \alpha \qquad (4.167)$$

$$m \left(\frac{\omega}{H}\right)^{n-1} \frac{d^2 c(z)}{dz^2} = -\alpha \qquad (4.168)$$

Граничные условия уравнений таковы:

$$\sigma_{rr}\big|_{r=R} = \sigma_R; \qquad \sigma_{rr}\big|_{r=R_0} = \sigma_{R_0} \qquad (4.167a)$$

$$c(z)\big|_{z=0} = 0; \qquad c(z)\big|_{z=H} = 0 \qquad (4.168a)$$

Если в зоне дискового зазора осуществляется транспортирование расплава к центру без создания напора, который обеспечивается червячной насадкой на диске, то

$$\sigma_R \approx \sigma_{R_0} \approx 0 \qquad (4.169)$$

Граничные условия (4.168а) следуют из равенства радиальной скорости v_r (4.164) на стенках дисков нулю из-за прилипания к ним расплава.

Интегрируя (4.167) при условиях (4.167а) и (4.169), получаем выражение для α:

$$\alpha = -(1 - n) \frac{m_1 (\omega/H)^{n_1} (R^{n_1} - R_0^{n_1})}{n_1 (R_0^{n-1} - R^{n-1})} \qquad (4.170)$$

Если же выполним интегрирование (4.167) с одним переменным пределом, то получим выражение для $\sigma_{rr}(r)$:

$$\sigma_{rr}(r) = m_1 \left(\frac{\omega}{H}\right)^{n_1} \frac{1}{n_1} \left[\frac{R^{n_1} - R_0^{n_1}}{R_0^{n-1} - R^{n-1}} (r^{n-1} - R^{n-1}) - (R^{n_1} - r^{n_1})\right] \qquad (4.171)$$

Выполняя интегрирование уравнения (4.168) при условиях (4.168а), получаем функцию $c(z)$; введение ее в (4.164) дает выражение для $v_r(r, z)$:

$$v_r(r, z) = [\alpha/(rm)]\,(\omega/H)^{1-n}\,(z^2 - zH) \qquad (4.172)$$

Производительность дисковой зоны Q есть расход через кольцевое сечение с радиусом r и высотой H:

$$Q = \int_0^H v_r(r, z)\,2\pi r dz = -(\alpha\pi/3m)\,(\omega/H)^{1-n}H^3 \qquad (4.173)$$

Если в (4.173) ввести выражение для α (4.170), выведенное при условии (4.169), то получим формулу для расчета транспортирующей способности дисковой зоны.

Равнодействующая нормальных напряжений σ_{zz} (см. рис. 4.58) создает осевое усилие F, действующее на диски:

$$F = \int_{R_0}^{R} -\sigma_{zz}(r)\,2\pi r dr \qquad (4.174)$$

Знак «минус» при σ_{zz} учитывает тот факт, что это напряжение сжатия.

Реологическое соотношение (1.19) применительно к рассматриваемому случаю имеет следующий вид:

$$\sigma_{rr} - \sigma_{zz} = -\varepsilon\,(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}) \qquad (4.175)$$

Входящие в него величины $\sigma_{rr}(r)$ и $(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr})$ определены выражениями (4.171) и (4.159). Разрешая (4.175) относительно σ_{zz} и вводя его в (4.174), получаем формулу для расчета распорного усилия F:

$$F = 2\pi m_1 \left(\frac{\omega}{H}\right)^{n_1} \left\{\frac{1}{n_1}\,\frac{R^{n_1} - R_0^{n_1}}{R_0^{n-1} - R^{n-1}}\left[\frac{R^{n+1} - R_0^{n+1}}{n+1} - \frac{R^{n-1}(R^2 - R_0^2)}{2}\right] - \right.$$
$$\left. - \frac{R^{n_1}}{2n_1}\,(R^2 - R_0^2) + \frac{1}{n_1 + 2}\left(\frac{1}{n_1} + \varepsilon\right)(R^{n_1+2} - R_0^{n_1+2})\right\} \qquad (4.176)$$

Окружные касательные напряжения $\sigma_{\theta z}$ создают момент сопротивления вращению диска M. Выражение для этого момента имеет вид

$$M = \int_{R_0}^{R} r \cdot \sigma_{\theta z}(r)\,2\pi r dr \qquad (4.177)$$

Здесь

$$\sigma_{\theta z} = \eta\dot{\gamma}_{\theta z}; \qquad \eta = m(T)\,\dot{\gamma}^{n-1}; \qquad \dot{\gamma} \approx \dot{\gamma}_{\theta z} = \omega r/H \qquad (4.178)$$

Вводя (4.178) в (4.177), получаем формулу для расчета момента сопротивления:

$$M = [2\pi m/(n+3)]\,(\omega/H)^n\,(R^{n+3} - R_0^{n+3}) \qquad (4.179)$$

4.16.3. Конструкции основных механизмов

Из формул (4.173) и (4.170) видно, что транспортирующая способность дисковой зоны зависит: от реологических параметров m, n, m_1, n_1, характеризующих вязкие и упругие свойства расплава; от геометрических параметров канала R, R_0, H; от частоты вращения диска ω.

Соблюдения равенства производительностей зоны питания, дисковой зоны и червячной нагнетающей зоны можно добиться, если, например, вычислить по формуле (4.36) производительность червячной зоны, приравнять ее выражению (4.173) и вычислить расстояние между дисками H, удовлетворяющее условию равенства производительностей зон. Однако полученное таким образом значение H будет удовлетворять отмеченному условию только для одного материала с принятым в этом расчете соотношением реологических констант m, m_1, n, n_1. Экструдер же является универсальной машиной, предназначенной для пе-

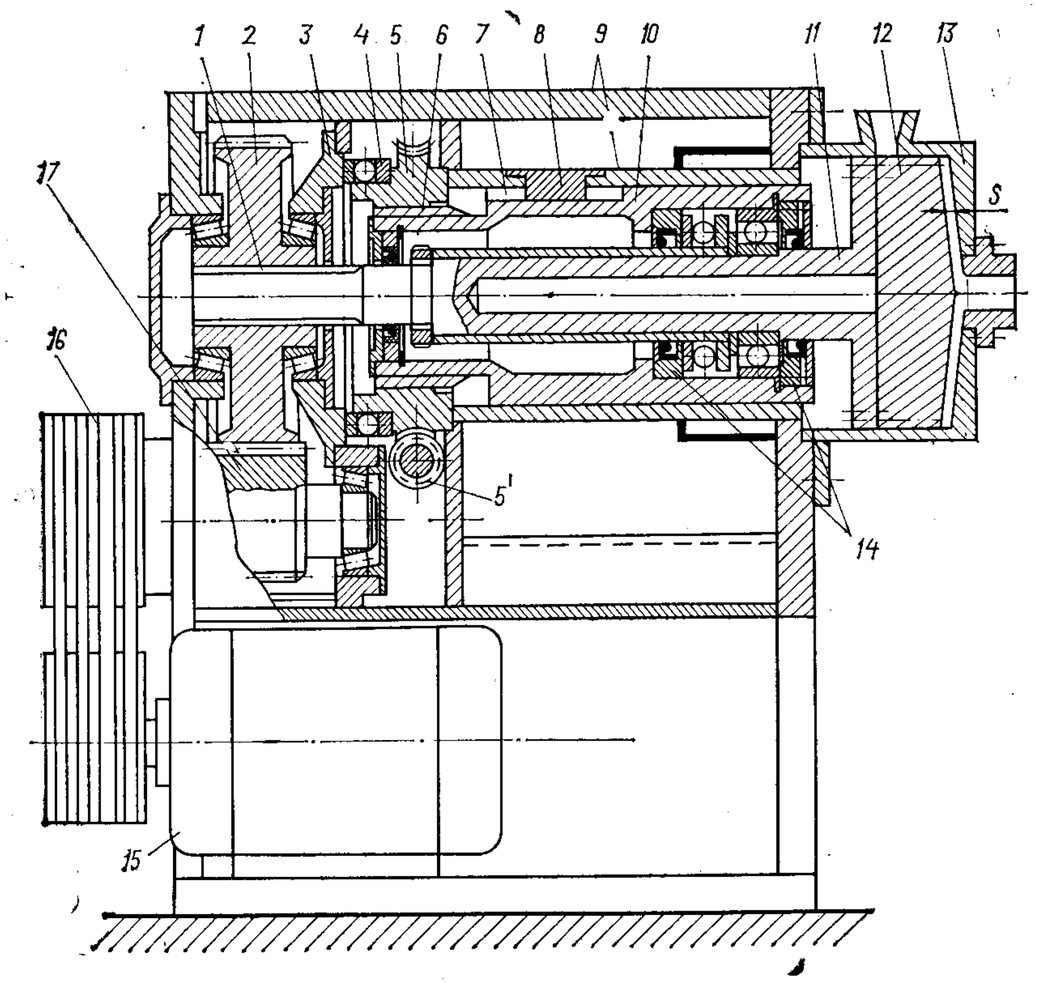


Рис. 4.59. Конструктивная схема дискового экструдера:
1 — подвижное шлицевое соединение; *2*, *17* — зубчатая пара; *3* — фланец; *4* — упорный подшипник; *5*, *5'* — червячная пара; *6* — винтовая пара; *7* — шпоночный паз; *8* — шпонка; *9* — корпус экструдера; *10* — ступица; *11* — вал; *12* — подвижный диск; *13* — неподвижный диск; *14* — узел упорного и радиального подшипников; *15* — электродвигатель; *16* — клиноременная передача.

реработки широкой гаммы материалов с различным соотношением этих констант. В связи с этим возникает необходимость в бесступенчатом регулировании расстояния между дисками.

Механизм, обеспечивающий это регулирование, — один из основных механизмов червячно-дисковых машин. Большое осевое усилие на вращающемся диске требует введения в конструкцию мощного узла упорного подшипника (второй механизм). Наконец, третьим механизмом является привод диска во вращение. Конструкция привода максимально проста: большие рабочие частоты вращения диска позволяют осуществить передачу вращения к нему от двигателя постоянного тока посредством многоручьевой клиноременной или цепной передачи с передаточным отношением 2,5—3,5; возможно также использование одноступенчатого зубчатого редуктора. Иногда в качестве привода используются серийно выпускаемые моторы-редукторы.

На рис. 4.59 приведена конструктивная схема экструдера с механизмом регулирования зазора посредством осевого смешения вращающегося диска. Вращение от электродвигателя *15* передается валу *11* подвижного диска *12* через клиноременную передачу *16*, зубчатую пару *2,17* и подвижное шлицевое соединение *1*. Регулирование зазора *S* между подвижным *12* и неподвижным *13* дисками осуществляется с помощью механизма, включающего в себя червячную передачу *5, 5′* и винтовую пару *6*, образованную червячным колесом *5* и ступицей *10*. При регулировании зазора червяк *5′* вращают вручную с помощью штурвала (на чертеже не показан). Вращающееся при этом червячное колесо *5* вызывает осевое смещение ступицы *10*. Во избежание проворота вместе с колесом *5* ступица имеет шпоночный паз *7*, в который входит укрепленная на корпусе *9* шпонка *8*. Вместе со ступицей в осевом направлении смещаются узел упорного и радиального подшипников *14*, а также диск *12*.

Осевое усилие *F* с диска *12* передается на вал *11*, затем через бурт вала на внутреннее кольцо радиального подшипника, шайбу, упорный подшипник, корпус и ступицу *10*. Со ступицы это же усилие через винтовую пару *6* передается на червячное колесо *5*, упорный подшипник *4*, который вращается только при регулировании зазора, и, наконец, на фланец *3* корпуса *9*.

Все детали машины, передающие крутящий момент и осевое усилие, должны подвергаться прочностному расчету.

На рис. 4.60 показана конструктивная схема машины с регулированием зазора посредством осевого смещения внешнего, не вращающегося диска *2*. В данном случае при вращении червяка *8* и колеса *7* винтовая пара *6* заставляет смещаться в осевом направлении траверсу *5* с укрепленными на ней тремя колонками *4*. На них же укреплен фланец *3* внешнего диска, который при этом также перемещается, изменяя величину рабочего зазора.

Вращающийся диск *1* оснащен электрообогревом (показан перекрестной штриховкой). Узел подшипников *9* такой же, как и в конструкции, показанной на рис. 4.59.

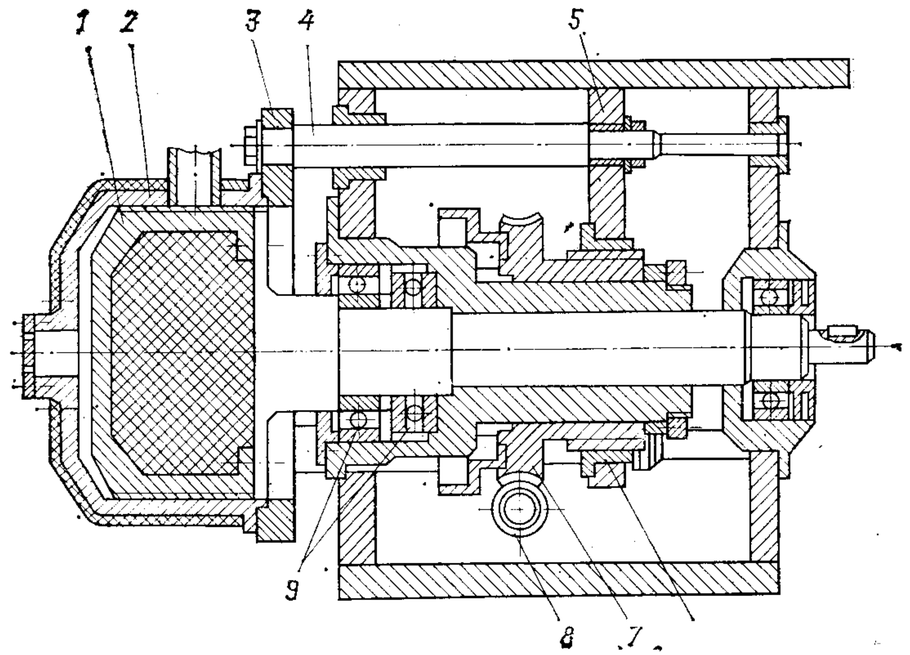


Рис. 4.60. Схема экструдера со смещающимся внешним диском:
1 — вращающийся диск; *2* — внешний, не вращающийся диск; *3* — фланец внешнего диска; *4* — колонка; *5* — траверса; *6* — винтовая пара; *7* — червячное колесо; *8* — червяк; *9* — узел подшипников.

ГЛАВА 5

МАШИНЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

5.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Литье под давлением — один из наиболее распространенных методов переработки пластмасс, состоящий в заполнении оформляющей полости формы через литниковый канал расплавом полимерного материала с последующим его уплотнением и фиксацией формы за счет охлаждения или протекания химической реакции отверждения (вулканизации). Этим методом перерабатываются практически все термопластичные материалы, термореактивные материалы (пресс-порошки и гранулят) и большинство марок резиновых смесей. Литье под давлением позволяет получать изделия сложной формы с арматурой, с элементами точных размеров, с минимальным облоем.

Литьевой цикл изготовления изделий (особенно толстостенных) короче цикла прессования. Процесс литья под давлением легко автоматизируется, что позволяет существенно повысить эффективность производства.

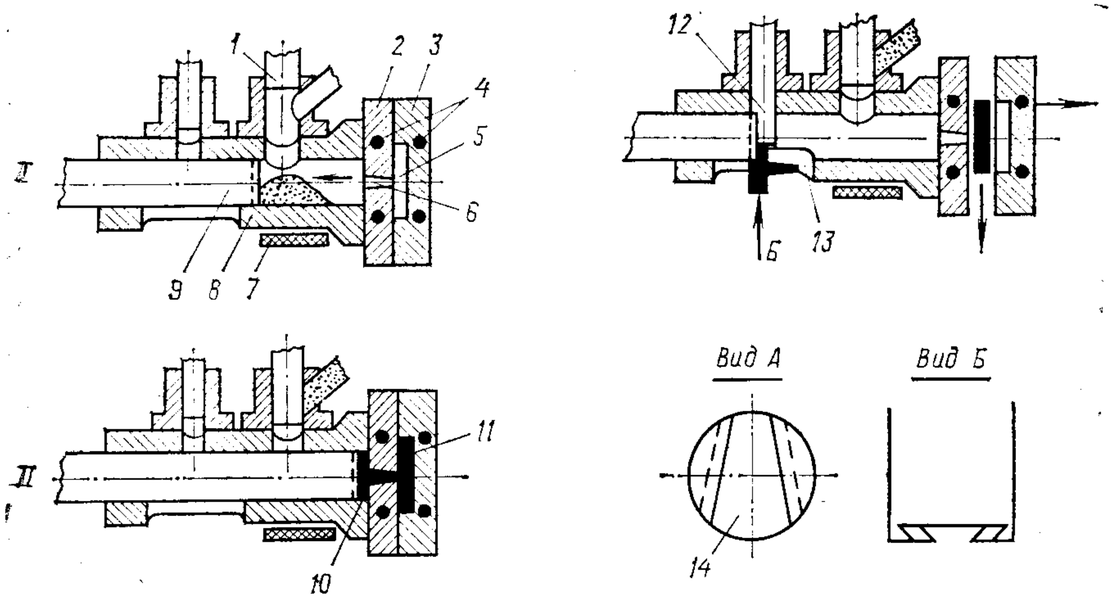


Рис. 5.1. Технологическая схема литья под давлением:

1 — поршень механизма дозирования; *2*, *3* — полуформы; *4* — каналы для ввода теплоносителя; *5* — оформляющая полость формы; *6* — литник; *7* — обогреватель цилиндра; *8* — литьевой цилиндр; *9* — литьевой поршень; *10* — остаток материала перед литьевым поршнем; *11* — изделие; *12* — механизм сброса остатка материала с литьевого поршня; *13* — окно; *14* — паз в поршне.

Поз. *I*, *II*, *III* — см. текст.

Все технологические схемы метода литья под давлением включают в себя следующие операции: перевод материала в вязкотекучее состояние посредством нагрева, деформирование материала с целью придания ему требуемой конфигурации и выдержка отформованного изделия при пониженной (для термопластов) или повышенной (для реактопластов и резиновых смесей) температуре в течение времени, достаточного для придания изделию формоустойчивости. В настоящее время в промышленных масштабах получили распространение несколько технологических схем литья под давлением. Различие этих схем заключается в способе и степени нагрева материала, способах ввода его в форму и последующего формования.

Цикл изготовления изделия этим методом состоит в следующем (рис. 5.1). Порция порошкообразного или гранулированного материала, находящегося при комнатной температуре T_0, поднятием поршня *1* механизма дозирования ссыпается в камеру нагретого до температуры $T_ц$ литьевого цилиндра *8* (поз. *I*). При движении литьевого поршня *9* вперед (поз. *II*) материал уплотняется, затем поршень *9* останавливается, продолжая оказывать давление на материал; происходит нагрев материала за счет теплопередачи от стенок нагреваемого обогревателем *7* цилиндра *8*. Материал переходит в вязкотекучее состояние и под давлением (до 80—140 МПа) вновь начинающего перемещаться поршня расплав из камеры материального цилиндра *8* через литник *6* выдавливается в оформляющую полость формы *5*,

состоящей из полуформ *2* и *3*. После окончательного заполнения полости формы небольшая часть материала *10* (3—7% от массы порции) остается в камере. Эту операцию называют *впрыском*, или *заполнением формы*.

Следующая операция — *выдержка под давлением*, в течение которой литьевой поршень *9* продолжает оказывать на расплав в камере давление, передающееся в оформляющую полость. Эта операция проводится с целью предотвращения обратного перетекания расплава из формы в цилиндр через незатвердевший литник. В течение этого времени расплав продолжает интенсивно нагреваться от теплоносителя, подводимого через каналы *4* (в случае переработки реактопластов и резин) или охлаждаться (при переработке термопластов).

По истечении времени выдержки под давлением, после того как материал в значительной степени потерял свойство текучести, начинается следующая операция — *выдержка на отверждение (охлаждение)*. При этом поршень *9* уже не оказывает давления на материал в полости формы *11*, так как полимер в литнике затвердел. После придания изделию формоустойчивости в результате охлаждения или протекания реакции отверждения (вулканизации) начинается операция *извлечения изделий из формы*.

Порядок машинных действий при выполнении операции извлечения изделия существенно зависит от варианта конструктивного оформления процесса. В варианте, показанном на рис. 5.1, литьевой поршень перемещается в исходное положение (поз. *III*), увлекая за собой остаток затвердевшего материала. В конце хода поршня *9* остаток материала *10* снимается с паза *14*, выполненного в поршне, и удаляется через окно *13* в цилиндре *1* при помощи механизма сброса *12*. После этого (или одновременно с этим) форма раскрывается, из оформляющей полости выталкивается готовое изделие *11*.

Подобным же образом перерабатываются литьем под давлением резиновые смеси. В отличие от термопластов и реактопластов, подаваемых в виде порошков и гранул, резиновая смесь поступает в загрузочное отверстие в виде монолитных заготовок требуемой массы.

5.2. ОБЩЕЕ УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЛИТЬЕВОЙ МАШИНЫ

Первоначально метод литья под давлением был освоен промышленностью на оборудовании, применявшемся для прессования. Затем появился новый вид оборудования: одно- и многопозиционные литьевые машины, имеющие существенные конструктивные отличия от прессов. Однако первоначальная технологическая схема метода не претерпела принципиальных изменений до настоящего времени.

Процесс переработки осуществляется на серийно выпускаемых промышленностью литьевых машинах, состоящих из двух

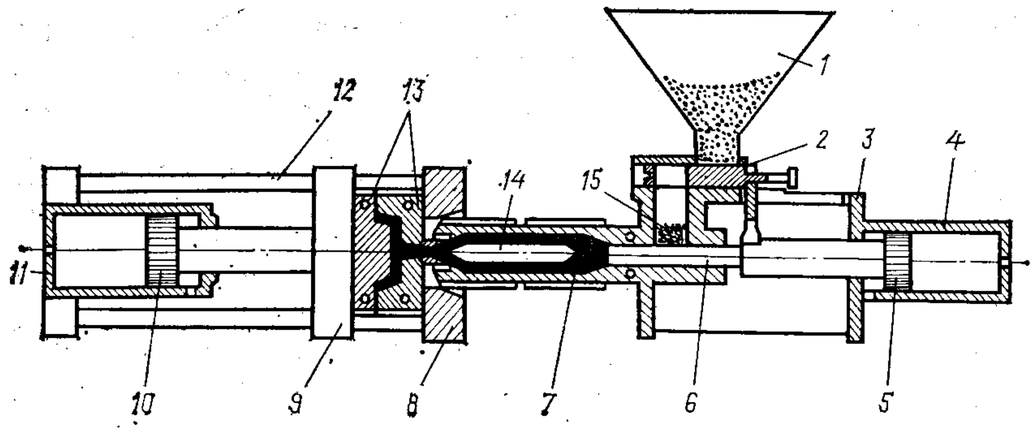


Рис. 5.2. Общая схема литьевой машины с поршневой пластикацией расплава: *1* — бункер; *2* — дозатор; *3* — корпус; *4* — гидроцилиндр механизма впрыска; *5* — поршень гидроцилиндра впрыска; *6* — литьевой поршень; *7* — пластикационный цилиндр; *8* — неподвижная плита; *9* — подвижная плита; *10* — поршень гидроцилиндра механизма запирания формы; *11* — гидроцилиндр механизма запирания формы; *12* — колонна; *13* — полуформы; *14* — торпеда-рассекатель потока расплава; *15* — загрузочное отверстие.

частей: *механизма пластикации — впрыска* и *механизма запирания формы*. Первая из этих частей служит для дозирования материала, его пластикации и впрыска расплава в форму. Вторая часть предназначена для крепления литьевой формы, ее перемещения и удержания в сомкнутом состоянии.

Литьевые машины в соответствии с конструкцией механизма пластикации подразделяются на машины с *поршневой* и *червячной пластикацией*. Схема литьевой машины с поршневой пластикацией представлена на рис. 5.2.

Механизм пластикации — впрыска этой машины состоит из гидроцилиндра *4* с поршнем *5*, литьевого (инжекционного) поршня *6*, пластикационного цилиндра *7* и устройства дозирования (бункер *1* с дозатором *2*). Все перечисленные детали установлены на корпусе *3*. Механизм запирания формы включает в себя две плиты (подвижную *9* и неподвижную *8*) и гидроцилиндр *11* с поршнем *10*. Подвижная плита *2* может перемещаться по колоннам *12*, жестко связывающим неподвижную плиту *8* и гидроцилиндр *11*.

Необходимым инструментом для осуществления процесса литья является литьевая форма, конструкция и размеры которой определяются изготавливаемым изделием. Обычно форма состоит из двух полуформ *13* (см. рис. 5.2) и охлаждается циркулирующим теплоносителем или нагревается электронагревательными элементами, расположенными в обеих полуформах. В одной из полуформ (правой на рис. 5.2) имеется конусное отверстие — центральный литниковый канал (*литник*).

Цикл работы литьевой машины с поршневой пластикацией складывается из последовательности ряда машинных операций. Первая — смыкание полуформ *13*, укрепленных на плитах *8* и *9*, с помощью гидроцилиндра *11* и поршня *10*. Далее дозатор *2* подает перерабатываемый материал из бункера *1* в загрузочное отверстие *15*. После этого в результате подачи гидравлической жидкости в правую (рабочую) полость гидроцилиндра *4* поршень *5* и связанный с ним поршень *6* перемещаются влево, вследствие чего материал проталкивается в пластикационный (нагревательный) цилиндр *7*. Продолжая двигаться, поршень *6* перемещает перерабатываемый материал через нагреваемое пространство между стенками цилиндра *7* и торпеды-рассекателя *13*. Движение поршня *6* заканчивается по завершении процесса заполнения формы, т. е. после прохождения расплава полимера из цилиндра *7* через центральный литник и достижения им конечных участков полости литьевой формы *12*. После некоторой выдержки под давлением поршень *6* отходит в исходное положение вследствие подачи рабочей жидкости в левую (возвратную) полость гидроцилиндра *4*. После выдержки на отверждение машинный цикл заканчивается размыканием полуформ *13* при перемещении влево поршня *10* гидроцилиндра *11*.

Значительный прогресс в области литья под давлением был связан с использованием червячной предварительной пластикации расплава. На рис. 5.3 показана схема литьевой машины, в которой червяк *6* выполняет одновременно функции пластицирующего и дозирующего рабочего органа и впрыскивающего поршня. При предварительной пластикации червяк *6*, вращаясь от привода *2*, перемещает перерабатываемый материал из бункера *1* в переднюю часть нагревательного цилиндра *7*. При этом червяк и связанный с ним поршень *4* отходят вправо. Далее механизм прессовой части (гидроцилиндр *11* с поршнем *10* и плиты *8* и *9*) смыкает полуформы *12*. После этого весь механизм пластикации и впрыска специальным устройством подводится к правой полуформе, и осевым перемещением червяка *6* влево с помощью гидроцилиндра впрыска *3* и поршня *4* доза расплава, накопившаяся при предварительной пластикации перед червяком, впрыскивается в литьевую форму. Затем осуществляется выдержка материала под давлением. После этого сле-

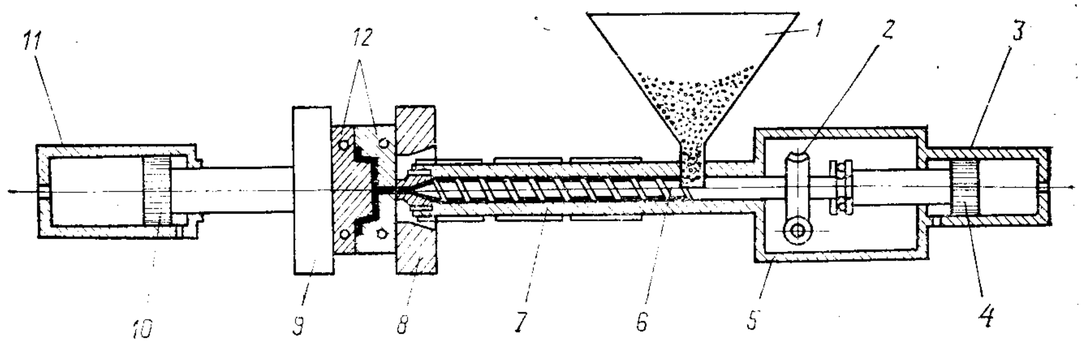


Рис. 5.3. Общая схема литьевой машины с червячной пластикацией расплава: *1* — бункер; *2* — привод; *3* — гидроцилиндр впрыска; *4* — поршень гидроцилиндра впрыска; *5* — корпус; *6* — червяк; *7* — пластикационный цилиндр; *8* — неподвижная плита; *9* — подвижная плита; *10* — поршень гидроцилиндра механизма смыкания формы; *11* — гидроцилиндр механизма смыкания формы; *12* — полуформы.

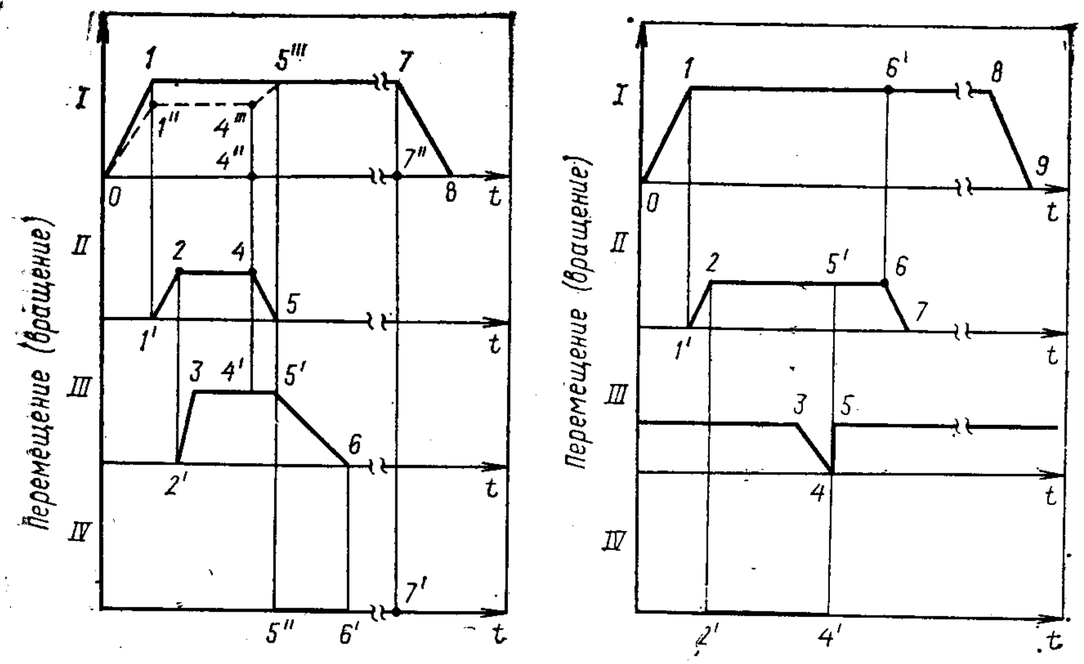


Рис. 5.4. Циклограммы работы литьевой машины в режиме литья под давлением:

I — смыкание и размыкание формы; *II* — перемещение узла инжекции (пластикации и впрыска); *III* — осевое перемещение червяка; *IV* — вращение червяка. Штриховая линия — режим литьевого прессования.

Рис. 5.5. Циклограмма интрузионного формования:

I — смыкание и размыкание формы; *II* — перемещение механизма пластикации и впрыска; *III* — осевое перемещение червяка; *IV* — вращение червяка.

дуют две одновременно проводимые технологические операции: выдержка изделия в форме на отверждение (без давления) и подготовка порции материала в цилиндре *7* для следующего цикла литья. При этом чаще всего инжекционный механизм отводится от формы.

Циклограмма работы литьевой машины, работающей по описанному технологическому методу (по схеме «червяк — поршень»), представлена на рис. 5.4. Цикл начинается смыканием формы (участок 0—*1* циклограммы), далее следуют перемещение механизма инжекции (*1′—2*) и впрыск подготовленной дозы (*2′—3*). В течение некоторого времени (*3—4′*) червяк продолжает оказывать давление на расплав. Затем отводится назад механизм впрыска (*4—5*), и червяк начинает вращение (*5″—6′*), одновременно смещаясь назад (*5′—6*). При пластикации относительно невысокое давление в гидроцилиндре *4* (см. рис. 5.3) препятствует осевому смещению червяка, создавая в накапливаемой дозе расплава давление, которое обеспечивает ее монолитность. Пластикация протекает одновременно с выдержкой в форме на отверждение (*4″—7″*). По окончании выдержки форму раскрывают (*7—8*). Время выдержки (*4″—7″*), как правило, значительно больше времени набора дозы (*5″—6′*).

Литьевые машины современных конструкций способны осуществлять операцию пластикации на любом участке временно́го интервала (*5″—7″*), причем в отдельных конструкциях оказывается возможным начинать пластикацию таким образом, чтобы ее конец (точка *6′*) совпадал по времени с началом впрыска в форму (точка *2′*) в следующем цикле. Такая организация машинного цикла позволяет свести к минимуму время пребывания дозы расплава в цилиндре перед впрыском.

Конструкция некоторых машин предусматривает во время проведения операции впрыска расплава временное (на 0,5—2 с) прекращение осевого перемещения червяка с одновременным частичным раскрытием (на 1,5—3 мм) полуформ. Эти изменения в циклограмме работы машины необходимы для удаления растворенных в материале летучих и газообразных продуктов реакции отверждения (вулканизации) при литье под давлением реактопластов (резиновых смесей). Эта операция называется *подпрессовкой*. На литьевых машинах для переработки термопластов (термопластавтоматах), для переработки реактопластов (реактопластавтоматах) и для литья резиновых смесей могут быть реализованы различные режимы формования. К разновидностям технологии литья под давлением относятся режимы интрузионного формования, литьевого прессования, формования со сбросом давления и виброформования.

Основные отличия *интрузионного формования* от литья под давлением заключаются в том, что операции пластикации и впрыска (заполнения формы) в данном случае совмещены, а основная доля объема оформляющей полости заполняется расплавом при помощи вращающегося и неподвижного в осевом направлении червяка. Преимущество интрузионного формования перед литьем под давлением состоит в возможности формования изделий с массой, во много раз превышающей максимально возможную массу дозы, которую способен накопить червяк в пластикационном цилиндре.

Циклограмма одного из вариантов способа интрузионного формования приведена на рис. 5.5. После смыкания формы (участок 0—*1*) и подвода механизма пластикации впрыска (*1—2*) червяк, пребывая в крайнем переднем положении, начинает вращаться (точка *2′*) и нагнетать расплав в оформляющую полость формы.

По мере заполнения формы ее гидравлическое сопротивление и, следовательно, давление расплава перед червяком возрастают. По достижении определенного давления перед червяком и соответствующего ему заданного давления в гидроцилиндре механизма впрыска последнее в дальнейшем остается постоянным, а червяк, продолжая вращаться, перемещается назад в осевом направлении на заданное расстояние (*3—4*). По достижении заданной позиции *4*, червяк, прекратив вращение, впрыскивает подготовленную дозу в форму (*4—5*), завершая ее заполнение. Далее следуют операции выдержки под давлением (*5′—6*), от-

вода узла инжекции (*6—7*), выдержки на отверждение (*6′—8*) и размыкания формы (*8—9*).

Литьевое прессование (или *трансферное формование*) предназначается для изготовления деталей сложной конфигурации из высоковязких полимерных материалов с низкой термостабильностью. Этот метод был уже описан ранее как разновидность метода прямого (компрессионного) прессования на гидравлических прессах. В современном варианте литьевого прессования сохранены его основные принципы, однако при совмещении двух технологических процессов: литья под давлением и прессования. Особенность данной модификации метода состоит в том, что на период заполнения литьем под давлением оформляющая полость литьевой формы находится в неполностью сомкнутом состоянии. Таким образом, первоначально в приоткрытой форме формуется заготовка, близкая по конфигурации и размерам к изделию. Последующая операция — прессование осуществляется при смыкании формы прессовой частью литьевой машины. При этом изделие окончательно формуется и далее отверждается.

Циклограмма литьевого прессования почти аналогична циклограмме литья под давлением (см. рис. 5.4). Отличие состоит в проведении смыкания формы не по участку (0—*1*), а по линии (*0—1″—4‴—5‴*), что обеспечивает впрыск расплава в неполностью сомкнутую форму (*2′—4′*) и прессование изделия при дальнейшем смыкании формы (*4‴—5‴*).

Режим формования со сбросом давления описан в разд. 5.2.1.

5.3. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ЛИТЬЕВОЙ ФОРМЕ

Цикл формования изделий из полимерных материалов при литье под давлением можно разделить на три последовательных периода: заполнение формы, выдержка под давлением и выдержка на охлаждение (отверждение — вулканизацию). Совокупность физических и химических процессов, сопровождающих каждый из указанных периодов, определяет динамику их протекания и качественные показатели готовых изделий.

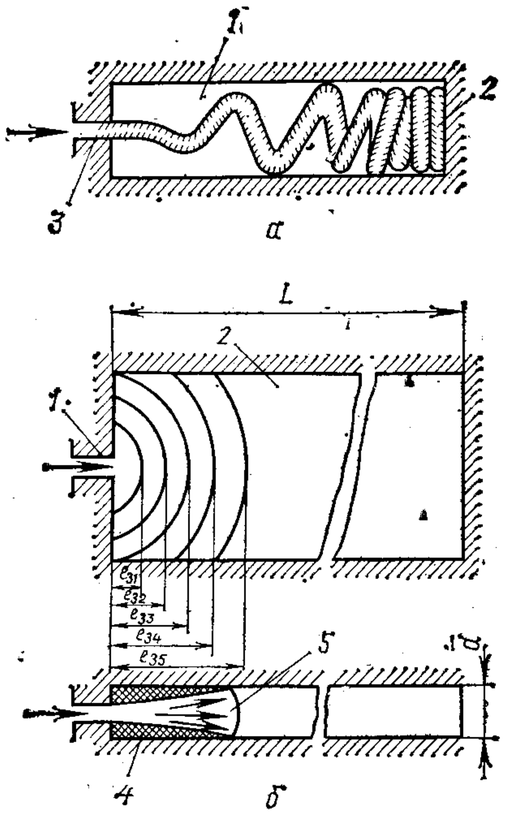
5.3.1. Заполнение формы

Заполнение оформляющей полости формы (впрыск расплава) начинается в момент прижатия сопловой части нагревательного цилиндра литьевой машины к отверстию центрального литника. Доза расплава из сопловой полости впрыскивается через литник и начинает заполнять оформляющую полость.

При заполнении формы расплавом полимера могут наблюдаться два режима заполнения: струйный и регулярный.

Струйный режим реализуется в основном при литье высоковязких материалов — наполненных термопластов и реакто-

Рис. 5.6. Схема заполнения оформляющей полости формы расплавом в струйном (*а*) и регулярном (*б*) режимах. Пояснение в тексте.



пластов, а также резиновых смесей при условии, что размеры впускного отверстия из литникового канала в полость формы намного меньше всех размеров оформляющей полости. Такой режим заполнения характерен для литья толстостенных массивных изделий, получаемых методом литьевого и интрузионного формования (рис. 5.6, *а*). Входящий через впускной литник *3* в полость *1* материал в форме жгута (струи) *2*, не касаясь сразу ее стенок, достигает тупиковой зоны полости. После этого начинается его укладка с возникновением точек контакта между отдельными участками струи, разрушением струи и постепенным уплотнением материала до его монолитизации.

Регулярный режим реализуется в основном при литье относительно тонкостенных изделий, когда расстояние $\overline{d}$ между противоположными стенками оформляющей полости *2* оказывается равным или несколько большим размера сечения впускного отверстия литника *1* (рис. 5.6, *б*). В этом случае при литье как низковязких, так и высоковязких материалов наблюдается появление регулярного, фронтального характера заполнения с переменной координатой фронта потока $l_{3i} \leqslant L$, где L — длина полости формы.

При литье термопластов в регулярном режиме при соприкосновении с холодными стенками формы расплав прилипает к поверхности полости формы, образуя пленку затвердевшего полимера *4*. Заполнение формы происходит за счет деформирования части потока расплава *5*, оставшейся не отвержденной. Полость формы заполняется постепенно в направлении от литника, при этом траектории движения частиц материала практически параллельны, за исключением участка входа и формирования фронта потока. При впуске материала в центральную часть полости имеет место радиальный характер растекания.

При литье реактопластов в регулярном режиме наблюдается *пробковый (блоковый)* характер заполнения формы ввиду наличия у расплавов этих материалов эффекта пристенного скольжения (см. разд 1.3.2). При течении в полости формы резино-

вых смесей достаточно хорошо выполняется условие прилипания их к стенке во всей области скоростей деформаций, реализуемых при литье под давлением.

Конфигурация литьевых изделий реального ассортимента, как правило, чрезвычайно сложна. Поэтому отливка одного изделия может осуществляться при различных режимах: струйный характер заполнения утолщенных частей оформляющей полости может переходить в регулярный при поступлении расплава в тонкостенные места полости и наоборот. Точно так же при заполнении различных частей оформляющей полости радиальный характер растекания может сменяться линейным и наоборот.

Технологическими параметрами процесса заполнения формы являются: давление литья на входе в форму $p_ф$, температура расплава на входе в форму $T_л$, скорость заполнения $V_з$, время полного заполнения формы $t_з$. Эти параметры зависят от конфигурации формуемого изделия, размеров и формы литьевого канала, а также регулируемых параметров технической характеристики: давления впрыска (номинального давления литья) $p_{нл}$, скорости осевого перемещения червяка, температуры формы $T_ω$, а также конструкции механизма впрыска.

Номинальное давление литья $p_{нл}$, реализуемое гидроцилиндром впрыска, рассчитывается по уравнению

$$p_{нл} = (D_п^2/d_ч^2)\, p_г \qquad (5.1)$$

где $D_п$ и $d_ч$ — диаметры поршня гидроцилиндра и червяка, соответственно; $p_г$ — давление в гидроцилиндре впрыска.

Давление $p_{нл}$ при продвижении расплава в системе нагревательный цилиндр — сопло — литниковый канал — форма служит для преодоления гидравлического сопротивления течению расплава в элементах этой системы (рис. 5.7). Течение расплава в период заполнения формы приводит к образованию перепадов давления в каждом из элементов системы. Общий перепад давления $\Delta p_{общ}$ равен их сумме:

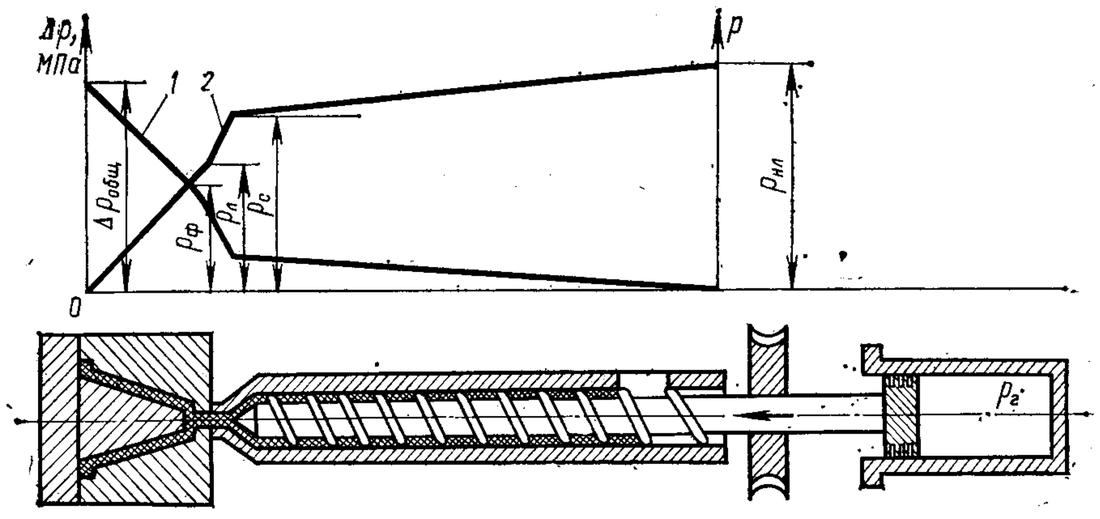


Рис. 5.7. Распределение перепада давлений Δp (*1*) и давления p (*2*) по длине машины L в период заполнения формы.

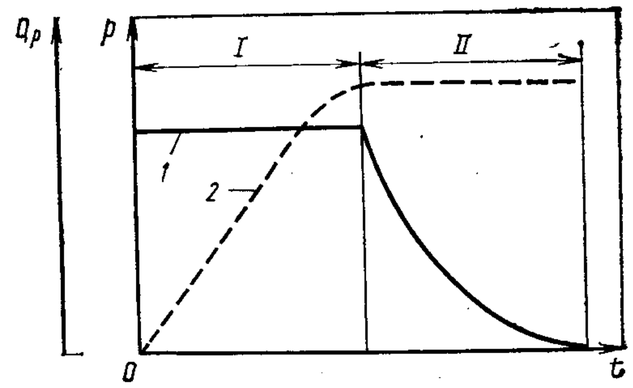


Рис. 5.8. Технологические режимы заполнения формы:
I — режим с постоянной объемной скоростью заполнения $Q_р$ и переменным давлением литья $p_л$; *II* — режим с переменной объемной скоростью заполнения $Q_р$ и постоянным давлением литья $p_л$; *1* — $Q_р(t)$; *2* — $p_л(t)$.

$$\Delta p_{общ} = p_{нл} - p_к = \Delta p_ц + \Delta p_с + \Delta p_л + \Delta p_ф \qquad (5.2)$$

где $p_к$ — давление в конце полости формы, равное нулю; $\Delta p_ц$, $\Delta p_с$, $\Delta p_л$ и $\Delta p_ф$ — потери давления в нагревательном цилиндре, сопле, литнике и форме соответственно.

Перепад давления $\Delta p_ц = p_{нл} - p_с$ связан с затратами части усилия впрыска на преодоление сил трения материала о стенки нагревательного цилиндра при осевом перемещении червяка. Перепады давления $\Delta p_с = p_с - p_л$, $\Delta p_л = p_л - p_ф$ и $\Delta p_ф = p_ф - p_к$ составляют потери давления при течении расплава в канале сопла, литниковой системе и оформляющей полости соответственно.

Механизм впрыска литьевой машины в большинстве конструкций способен осуществлять заполнение формы в двух регулируемых технологических режимах (рис. 5.8): а) *постоянной скорости литья* или б) *постоянного давления на входе в форму* при переменной скорости ее заполнения. Реализация первого или второго технологического режима связана с особенностями функционирования гидропривода впрыска.

Первый технологический режим заполнения формы, соответствующий достижению постоянной скорости литья (заполнения формы), возникает при литье толстостенных изделий. Если сопротивление сопла и литниковых каналов движению впрыскиваемого материала невелико, то давление в гидросистеме машины не достигает установленной величины $p_г$, и скорость заполнения принимают, исходя из производительности гидронасоса литьевой машины $Q_н$. Объемный расход расплава через литник $Q_р$ (см^3/с) равен:

$$Q_р = Q_н r_ч^2/(cR_п^2) \qquad (5.3)$$

где $r_ч$ и $R_п$ — радиусы сечения червяка и поршня гидроцилиндра соответственно; c — число параллельных литниковых каналов на участке.

Линейная скорость заполнения формы определяется из уравнения

$$V_з = Q_р/S_ф \qquad (5.4)$$

где $S_ф$ — площадь поперечного сечения формы.

Второй технологический режим заполнения формы, соответствующий достижению постоянного давления $p_ф$, характерен для литья тонкостенных изделий. Здесь ввиду значительности гидравлического сопротивления литниковых каналов и полости формы движению материала давление в гидросистеме $p_г$ возрастет до установленного значения за время, весьма малое по сравнению с временем протекания процесса заполнения. Постоянное давление в гидроцилиндре не может компенсировать возрастающего сопротивления продвижению материала, и скорость течения начинает убывать. Линейная скорость заполнения формы $V_з$ определяется при этом экспериментальным или расчетным путем. Расчет параметров процесса формования в режиме $p_ф = \text{const}$ представлен в разд. 5.3.2.

На характер течения расплава в полости формы оказывают влияние его вязкостные свойства, зависящие от температуры. Температура расплава повышается при литье реактопластов и резин за счет нагрева от стенок формы и диссипации энергии течения в литниковых каналах и полости формы. Температура расплава термопласта уменьшается при контакте со стенкой формы, имеющей температуру ниже температуры стеклования $T_с$ или плавления $T_{пл}$, т. е. $T_ш < T_с (T_{пл})$. Возрастание вязкости расплава приводит к увеличению перепада давления, затрачиваемого на течение в канале формы.

Наличие влаги в материале приводит к снижению вязкости расплава и увеличению скорости заполнения формы. Аналогичным образом сказывается присутствие в расплаве реактопластов смазывающих веществ.

5.3.2. Выдержка под давлением

Как уже отмечалось, процесс заполнения формы сопровождается образованием перепада давления по длине ее полости. Изменение давления по длине формы в различные моменты времени t_i показано на рис. 5.9. Изменение давления в одной точке формы можно проиллюстрировать диаграммой давление — время, представленной на рис. 5.10. Процесс заполнения формы завершается за отрезок времени $0—t_3$, при этом расплав достигает наиболее удаленной части формы. Затем следует период нарастания давления $t_3—t_{10}$ и период спада давления $t_{10}—t_{12}$.

После заполнения формы расплавом термопласта происходит его охлаждение, в результате чего увеличивается плотность и уменьшается объем, занимаемый полимером. Вследствие уменьшения объема через литники в форму продолжает поступать дополнительная порция расплава, так как червяк-поршень продолжает оказывать давление на материал в сопловой части, и давление в форме увеличивается (в начале полости от p_{01} до p_{02} и в конце полости от 0 до $p_к$).

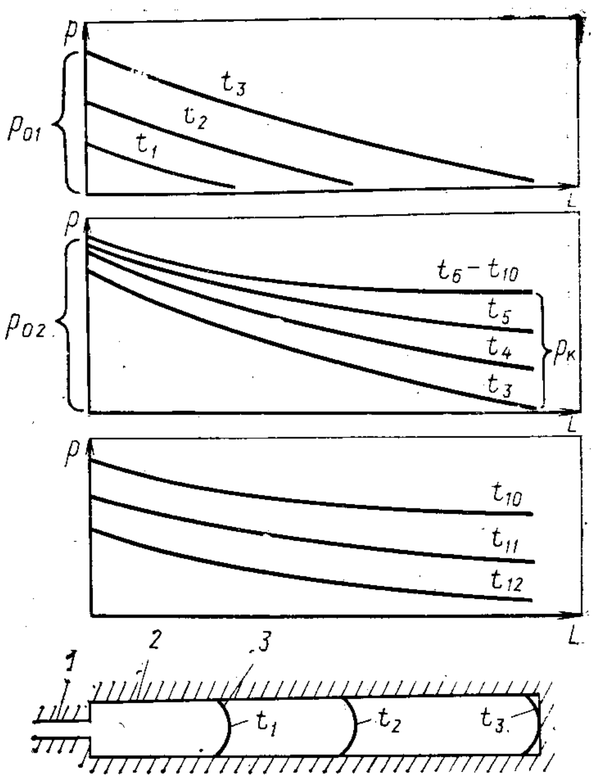


Рис. 5.9. Распределение давления p по длине L формы в различные моменты t_i периодов заполнения формы ($0—t_3$), нарастания давления ($t_3—t_{10}$) и спада давления ($t_{10}—t_{12}$):
1 — сопло; *2* — форма; *3* — фронт потока расплава.

Малая объемная скорость течения материала на этой стадии, называемой «подпиткой», вызывает снижение перепадов давления $\Delta p_ф$ по длине формы от значения $\Delta p_{ф1} = p_{01}$ в конце заполнения до значения $\Delta p_{ф2} = p_{02} — p_к$ (см. рис. 5.9). Снижение объемной скорости течения в литнике снижает также и перепад давления $\Delta p_л$ и повышает давление на входе в форму $p_ф$. По этой причине происходит втекание новых порций расплава в форму, что обеспечивает увеличение плотности расплава.

Стадия выдержки под давлением реактопластов и резиновых смесей протекает аналогичным образом. При этом уменьшение объема и увеличение плотности материала происходит не за счет его охлаждения в форме, а вследствие протекания процесса монолитизации довольно рыхлой структуры перерабатываемой композиции. Для расплавов реактопластов требуется значительно большее давление подпитки ввиду их высокой вязкости по сравнению с резиновыми смесями и термопластами.

Во время выдержки под давлением в сопловой части нагревательного (пластикационного) цилиндра также имеет место чрезвычайно медленное по сравнению с операцией впрыска течение. В связи с этим исчезают значительные потери усилия впрыска на перемещение червяка в цилиндре. Следовательно, усилие на червяке-поршне, необходимое для поддержания на входе в форму давления подпитки, оказывается меньшим, чем при впрыске. При этом отпадает необходимость в приложении полного усилия впрыска $P_в = (\pi d^2_ч/4) p_{нл}$ и появляется возможность установления на входе в форму давления $p_ф$ меньшего, чем на стадии впрыска.

По этой причине в современных конструкциях литьевого оборудования предусмотрен так называемый режим со сбросом

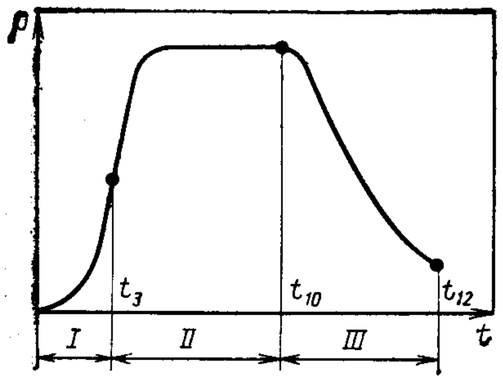


Рис. 5.10. Кривая давление — время для одной точки формы:
I — период заполнения (0—t_3); *II* — период нарастания давления (t_3—t_{10}); *III* — период спада давления (t_{10}—t_{12}).

давления, т. е. изменение давления в гидроцилиндре механизма впрыска после окончания впрыска и регулирование его в течение выдержки под давлением. Таким образом, *давление подпитки (дожатия)* — регулируемый технологический параметр этапа выдержки под давлением. Вторым технологическим параметром является *время выдержки под давлением*, определяемое временем отверждения литника.

5.3.3. Выдержка на охлаждение (отверждение — вулканизацию)

В конце выдержки под давлением изделие имеет требуемую конфигурацию и вследствие наступившей гидравлической изоляции формы в дальнейшем сохраняет постоянную массу. Выдержка на охлаждение изделия из термопласта необходима для окончательного затвердевания полимера и достижения определенной конструкционной жесткости изделия, исключающей его деформацию при удалении из формы. В процессе охлаждения давление в форме по всей длине снижается, что нашло отражение на диаграммах, приведенных на рис. 5.9 и 5.10 (отрезок времени t_{10}—t_{12}).

Основное назначение выдержки реактопластов и резиновых смесей на отверждение (вулканизацию) заключается в обеспечении одинаковой по всему объему изделия степени протекания реакции отверждения (вулканизации). Выполнение этого условия — один из основных факторов, определяющих качество готового изделия. При формовании особо толстостенных, массивных изделий допускается недовулканизация их сердцевины, так как после изъятия изделия из формы вследствие длительности охлаждения сердцевины реакция успевает пройти до нужной степени.

В период выдержки на отверждение (вулканизацию) в изолированном объеме изделия из реактопласта или резиновой смеси протекают два процесса: теплового расширения при нагреве отливки от стенок формы и несколько запаздывающей объемной усадки вследствие продолжающейся реакции. Преобладание на первой стадии выдержки первого из этих процессов вызывает рост давления в форме, преобладание второго процесса в дальнейшем обусловливает уменьшение давления в форме.

Максимальное давление $p_{макс}$, развивающееся в оформляющей полости, определяет минимально необходимое усилие запирания формы. Превышение распорного усилия, возникающего от давления в форме, над усилием запирания, приводит к раскрытию формы и вытеканию расплава в облой. Величину $p_{макс}$, являющуюся первым технологическим параметром этого этапа цикла литья, регулируют посредством изменения давления подпитки и степени нагрева расплава в объеме полости формы к концу выдержки под давлением. Вторым технологическим параметром процесса следует считать *время выдержки на охлаждение (отверждение — вулканизацию)*.

5.4. ПАРАМЕТРЫ ЛИТЬЕВОЙ МАШИНЫ

Параметры литьевых машин определяются особенностями процессов литья различных полимерных материалов, а также ассортиментом выпускаемых отливок. Основными параметрами технической характеристики литьевой машины являются: *объем впрыска за один цикл, давление литья, скорость впрыска, пластикационная производительность, усилие запирания (смыкания) формы, расстояние между колоннами прессовой части, максимальное и минимальное расстояния между плитами, ход подвижной плиты, наибольшая площадь отливки.* Эти параметры наиболее важны, поскольку они определяют возможность переработки того или иного материала, а также массу и размеры детали, которая может быть изготовлена на данной машине.

5.4.1. Расчет производительности и циклограммы работы литьевой машины

Теоретический объем впрыска литьевой машины равен площади впрыскивающего поршня, умноженной на его рабочий ход. Для машин с поршневой пластикацией рабочим ходом считают движение поршня после перекрытия загрузочного отверстия *15* (см. рис. 5.2) до его переднего конечного положения в цилиндре, а у червячных машин — полный ход червяка. Теоретический объем впрыска не тождественен реальному, т. е. тому объему расплава, который может быть подан в полость формы. Разница между теоретическим и реальным объемами впрыска, возникающая в результате собственной сжимаемости и монолитизации расплава, а также разного рода утечек, может достигать 5—10%.

Температуру материала (литья) $T_л$, температуру стенок формы T_w и объемную скорость заполнения $Q_р$ (или время заполнения) обычно задают, исходя из требований, предъявляемых к качеству изделий по показателям точности, прочностным и деформационным свойствам, внешнему виду. Эти параметры принимаются в соответствии с техническими условиями на материалы или каталогами.

При расчете параметров формования следует иметь в виду, что наиболее желательно проведение процесса заполнения в ре-

жиме постоянной объемной скорости течения $Q_р$, так как при этом обеспечивается стабильность свойств по длине изделия.

Объем дозы расплава подсчитывается по уравнению

$$v_0 = (v_{изд} n + v_л) k_{ут} k_{сж} \qquad (5.5)$$

где $v_{изд}$ — объем изделия; n — предполагаемая гнездность формы; $v_л$ — объем литниковой системы; $k_{ут}$ — коэффициент, учитывающий утечки расплава в червяке ($k_{ут} = 1{,}01 \div 1{,}02$); $k_{сж}$ — коэффициент, учитывающий сжатие расплава в нагревательном цилиндре.

Коэффициент $k_{сж}$ определяется как

$$k_{сж} = \frac{1}{1 - \varkappa p_ф}$$

где $\varkappa$ — коэффициент сжимаемости полимера (см. разд. 1.3.3).

Производительность литьевого оборудования $Q_л$ (кг/ч) может быть определена по формуле

$$Q_л = 3600 v_0 \rho / t_ц \qquad (5.6)$$

где ρ — плотность расплава, кг/см^3; $t_ц$ — время цикла литья, с.

Расчет *времени цикла литья* $t_ц$, входящего в (5.6), производится по формуле

$$t_ц = t_с + t_п + t_{вп} + t_в + t_{охл} + t_р \qquad (5.7)$$

где $t_с$ и $t_р$ — время смыкания и размыкания формы соответственно; $t_п$ — время подвода и отвода узла пластикации и впрыска; $t_{вп}$, $t_в$ и $t_{охл}$ — время впрыска, выдержки под давлением и выдержки на охлаждение (отверждение) соответственно.

Сумма времен $t_с$, $t_п$, $t_{вп}$ и $t_р$ называется машинным временем $t_{маш}$, так как зависит от быстродействия отдельных механизмов литьевой машины.

Времена $t_с$ и $t_р$ могут быть определены расчетным путем или выбраны, исходя из данных, представленных в табл. 5.1, и условия $t_с = t_р$. При использовании механизмов запирания комбинированного типа (см. разд. 5.7.1) с ускоренным, а затем замедленным движением подвижной плиты, время смыкания $t_с$ может быть представлено в виде двух составляющих: $t_с = t_{су} + t_{сз}$. Здесь $t_{су}$ — время ускоренного перемещения подвижной плиты и $t_{сз}$ — время замедленного перемещения (с) можно определить по формулам

$$t_{су} = 0{,}785 L_у d_у^2 / (Q_у \eta_к); \qquad t_{сз} = 0{,}785 L_з d_з^2 / (Q_з \eta_к) \qquad (5.8)$$

где $L_у$, $L_з$ — путь, проходимый плунжером ускоренно или замедленно, м; $d_у$, $d_з$ — диаметры поршней гидроцилиндров ускоренного или замедленного подвода подвижной плиты, м; $Q_у$, $Q_з$ — производительность гидронасосов систем ускоренного и замедленного подвода подвижной плиты, м/с; $\eta_к$ — к. п. д. насоса.

Расчет значений $d_у$, $d_з$, $Q_у$, $Q_з$ может быть проведен по методике, изложенной в разд. 5.7.2.

Аналогичным образом может быть рассчитано время $t_п$. Оно обычно не превышает 3—5 с.

Время впрыска расплава $t_{вп}$ в режиме постоянной объемной скорости движения расплава $Q_р = \text{const}$ подсчитывается, исходя из выбранной по технологическим соображениям $Q_р$. Значение $Q_р$ не должно выходить за границы минимума и максимума, установленных технологическим регламентом литья по результатам экспериментального изучения влияния скорости заполнения на показатели качества отливок. Для термопластичных материалов $Q_р$ выбирается в пределах 20—120 см^3/с, для реактопластов и резин 20—70 см^3/с.

С учетом (5.3) и (5.4) получаем формулу для расчета $t_{вп}$, равного времени заполнения формы $t_{зI}$ в режиме $Q_р = \text{const}$:

$$t_{вп} = t_{зI} = v_ф / Q_р \qquad (5.9)$$

где $v_ф$ — объем оформляющей полости формы.

Формула (5.9) может быть представлена и следующим образом:

$$t_{зI} = L / V_з \qquad (5.10)$$

где L — длина полости формы; $V_з$ — линейная скорость заполнения.

Если заполнение формы происходит во II-м технологическом режиме (убывающей скорости заполнения), то время заполнения формы $t_{зII}$ может быть определено расчетным путем, например с использованием зависимости (5.24). Если заполнение происходит первоначально в I-м, а затем во II-м технологических режимах, то последовательно рассчитываются периоды времени $t_{з\,I}$ и $t_{з\,II}$, а затем они суммируются:

$$t_{вп} = t_{зI} + t_{зII} \qquad (5.11)$$

Определение реализуемого режима заполнения при литье конкретного изделия проводится по методике, изложенной в разд. 5.4.2.

Время выдержки под давлением $t_в$ определяют, вычисляя время отверждения расплава в литниковом канале. Для расплава термопласта $t_в$ равно продолжительности охлаждения материала в центральной части литника до температуры $T_{охл}$, которая ниже температур $T_с$ или $T_{пл}$ (см. разд. 1.2.1). Решение уравнения теплопроводности в нестационарных условиях течения полимера со скоростью подпитки, зависящей от изменения объема полимера в оформляющей полости, довольно сложно. На практике применяют различные приближенные методы определения $t_в$.

Формула для расчета $t_в$ для цилиндрического литникового канала имеет вид

$$t_в = \frac{r_л^2}{5{,}76a} 2{,}3 \lg \frac{1{,}6 (T_л - T_w)}{T_с - T_w} \qquad (5.12)$$

где $r_л$ — радиус литника; a — коэффициент температуропроводности; $T_л$ — температура литья; T_w — температура стенки формы.

Для расплава реактопласта или резиновой смеси время $t_в$ определяется временем отверждения (вулканизации) материала в литнике. Вводя предположение, что время нагрева этого материала в весьма малом объеме литника мало по сравнению с временем отверждения литника, определяем $t_в \approx t_0$ по методике, изложенной в разд. 1.3.4.

Охлаждение расплава термопласта в полости формы начинается сразу же после заполнения формы и продолжается до достижения изделием конструкционной жесткости. Однако технологическое время задается в схеме управления машиной после отвода сопла, когда расплав в полости формы частично охладится. Поэтому для определения $t_{охл}$ сначала вычисляют общее время охлаждения $t_{об}$, а затем из него вычитают $t_в$. Расчет проводится по формулам, полученным из решения уравнения нестационарной теплопроводности, которые видоизменяются в зависимости от формы изделия. Для изделия типа «пластина»

$$t_{об} = 0{,}084 \frac{\bar{d}^2}{a} \lg\left(0{,}785 \frac{T_л - T_w}{T_{изд} - T_w}\right) \qquad (5.13)$$

где $\bar{d}$ — толщина изделия; $T_{изд}$ — температура извлеченного изделия ($T_{изд} - T_w = 10 \div 20$ К).

Для изделия из реактопласта или резиновой смеси составляющая общего времени цикла $t_{охл}$ должна быть заменена временем выдержки на отверждение изделия $t_{отв}$. Отрезок времени $t_{отв}$ может быть определен так:

$$t_{отв} = t_н + t_0 - t_в \qquad (5.14)$$

В формуле (5.14) $t_н$ — время нагрева расплава от $T_л$ до температуры $T_{ци}$ в центре изделия, отличающейся на 15—20 К от температуры стенки T_w:

$$t_н = 0{,}084 \frac{\bar{d}^2}{a} \lg\left(0{,}785 \frac{T_w - T_л}{T_w - T_{ци}}\right) \qquad (5.15)$$

Составляющая t_0 является временем отверждения изделия при $T_{ци}$ и может быть определена по методике, изложенной в разд. 1.3.4.

Таким образом, все составляющие времени цикла изготовления изделия могут быть определены при заранее выбранных значениях геометрических характеристик формы ($\bar{d}$, L, $v_ф$), свойств материала (a, $T_с$, $T_{пл}$, $\varkappa$, ρ) и параметров технологического режима (T_w, $T_л$, $Q_р$).

5.4.2. Давление литья и скорость впрыска

Номинальное давление литья $p_{нл}$ обусловливается гидроприводом литьевой машины и служит параметром, определяющим возможность заполнения оформляющей полости формы. Величина $p_{нл}$ равна сумме потерь давления $\Delta p_м$ в системе, предшествующей оформляющей полости формы, и потерь давления $\Delta p_ф$, затрачиваемых на течение расплава в полости формы. Величина $\Delta p_м = \Delta p_ц + \Delta p_с + \Delta p_л$ [см. обозначения к формуле (5.2)] связана с потерями давления при впрыске за счет трения сухого или расплавленного материала перед поршнем или заполняющего витки нарезки червяка о стенки цилиндра ($\Delta p_ц$), за счет сопротивления движению расплава через сопло ($\Delta p_с$) и литниковые каналы ($\Delta p_л$). Сумма потерь давления $\Delta p_{м1} = \Delta p_ц + \Delta p_с$ является величиной, зависящей в каждом конкретном случае от конструкции механизма пластикации и впрыска литьевой машины и свойств перерабатываемого материала. Точный количественный учет $\Delta p_{м1}$ затруднен, поэтому эта величина определяется в большинстве случаев экспериментально. Можно считать приближенно, что при литье термопластов $\Delta p_{м1}$ составляет 10—20%, при литье резиновых смесей 25—30% и при литье реактопластов до 40% от $\Delta p_{общ}$.

Величина $\Delta p_л$, затрачиваемая на течение аномально-вязких жидкостей (расплавов термопластов и резиновых смесей) в каналах различной формы в режиме $Q_р = \text{const}$, может быть рассчитана по соотношениям, полученным в гидродинамическом анализе установившегося течения расплавов полимеров при совместном рассмотрении уравнений движения, неразрывности, энергии и реологического в форме (1.13) в изотермических условиях. Изотермическое течение является идеализированным режимом, который редко осуществляется в реальных процессах переработки полимеров, однако, учитывая чрезвычайную сложность решения задач в неизотермическом рассмотрении, для инженерных расчетов подобное упрощение является вполне приемлемым. Задача решается также при введении допущений об отсутствии скольжения потока относительно стенок канала и влияния гравитационных и инерционных сил.

Для каналов круглого и прямоугольного поперечного сечения соответственно

$$\Delta p_л = 2Lm_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right)\left(\frac{3n+1}{\pi n} \frac{Q_р}{r^{(3n+1)/n}}\right)^n$$

$$\Delta p_л = 2Lm_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right)\left[\frac{2(2n+1)}{n} \frac{Q_р}{Bh^{(2n+1)/n}}\right]^n \qquad (5.16)$$

где L — длина; r — радиус; B — ширина; h — высота канала; m_0, E, n, R — константы уравнения (1.13).

Учитывая существование потерь давления на входе в канал, затрачиваемых на формирование профиля скоростей течения, длину канала L условно увеличивают настолько, чтобы фактический перепад давлений в канале условной длины был равен градиенту давлений на участке установившегося течения. Для канала круглого поперечного сечения фиктивное удлинение оценивается числом $N_д$ диаметров D канала:

$$L_ф = L + N_д D \qquad (5.17)$$

Для расплавов термопластов $N_д$ изменяется от 1—2 при $\dot{\gamma}=100$ с$^{-1}$ до 5—6 при $\dot{\gamma}=700 \div 900$ см$^{-1}$; для резиновых смесей при изменении $\dot{\gamma}$ от 100 до 1000 с$^{-1}$ число $N_д$ увеличивается с 3—4 до 10—12.

Для расплавов реактопластов, движение которых в каналах подчиняется закону пристенного скольжения (1.20), может быть получена аналитическая зависимость для расчета $\Delta p_л$ в изотермических условиях для каналов круглого и прямоугольного поперечного сечения соответственно:

$$\Delta p_л = 2Lk_c Q_р^s/(\pi^s r^{2s+1}) \qquad (5.18)$$

$$\Delta p_л = 2(B+h)Lk_c Q_р^s/(Bh)^{s+1}$$

где k_c и s — константы уравнения (1.20).

Фиктивное удлинение канала для учета входного эффекта по формуле (5.17) для реактопластов составляет 9—20 D при изменении скорости пристенного скольжения $V_c = Q_р/(\pi r^2)$ от 10^{-1} до 1 м/с.

Литниковая система представляет собой совокупность последовательно или параллельно соединенных элементов (центральный, распределительный, впускной литник и т. д.). При последовательном соединении элементов общий перепад давления $\Delta p_л$ определяется как сумма перепадов давления в отдельных элементах:

$$\Delta p_л = \Delta p_{л1} + \Delta p_{л2} + \ldots + \Delta p_{лN} = \sum_{i=1}^{N} \Delta p_{лN} \qquad (5.19)$$

При параллельном соединении элементов литниковых каналов объемная скорость течения $Q_{рN}$ в каждом из элементов равна

$$Q_{рN} = Q_р/N \qquad (5.20)$$

где N — число одинаковых элементов каналов.

Перепад давления $\Delta p_л$ при параллельном соединении элементов каналов равен перепаду давления по длине одного из них: $\Delta p_л = \Delta p_{лN}$.

При определении перепада давления $\Delta p_ф$ проводят упрощения конфигурации изделия. Сложные изделия можно заменить эквивалентными изделиями, представляющими собой последо-

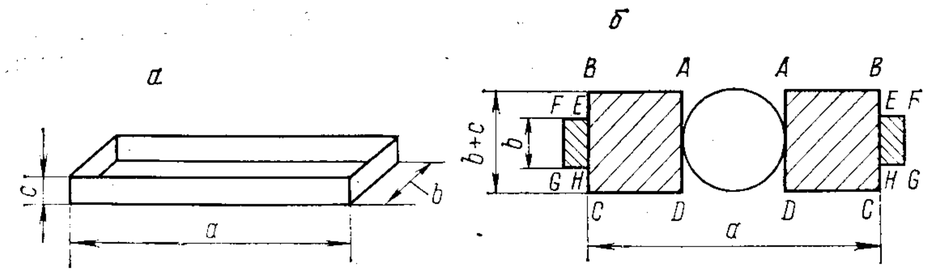


Рис. 5.11. Изделие типа «коробка» и его эквивалентная схема для расчета перепада давления $\Delta p_ф$.

вательно и параллельно соединенные простейшие элементы: диски, пластины, цилиндры. Например, изделие типа «коробка», изображенное на рис. 5.11, *а*, развертывается в плоское эквивалентное изделие (рис. 5.11, *б*), которое состоит из двух последовательно соединенных участков. Первый участок представляет собой диск, второй состоит из двух параллельно соединенных частей, каждая из которых составлена из последовательно соединенных прямоугольников *ABCD* и *EFGH*. При радиальном характере заполнения участка «диск» для упрощения расчетов диск заменяют рядом n последовательно соединенных прямоугольных каналов, на течение в которых затрачивается тот же перепад давления, что и на течение в диске. Каждый i-тый прямоугольный канал имеет следующие размеры: длина $L_i = R_д/n$, ширина $B_i = \pi R_д(2i-1/n,)$, где $R_д$ — радиус диска. Расчет $\Delta p_ф$ в эквивалентном канале проводится так же, как в прямоугольном.

Величина $\Delta p_ф$ в первом технологическом режиме заполнения ($Q_р = \text{const}$) определяется по формуле (5.16) для термопластов и резиновых смесей и по формуле (5.18) — для реактопластов (при замене $\Delta p_л$ на $\Delta p_ф$). Величина $\Delta p_ф$ во втором технологическом режиме заполнения ($p_ф = \text{const}$) имеет постоянное значение:

$$\Delta p_ф = p_{нл} - \Delta p_м = \text{const} \qquad (5.21)$$

Скорость движения расплава в полости формы не является постоянной величиной в режиме заполнения $p_{нл} = \text{const}$, а зависит от возрастающего во времени сопротивления заполненной части формы $l_з = f(t)$. Зависимость $Q_р$ или $V_з$ от переменной длины фронта потока расплава $l_з$ не может быть получена из рассмотрения задачи об изотермическом течении расплава аномально-вязкой жидкости подобно тому, как это было сделано при выводе формул (5.16), поскольку именно неизотермичность процесса, выражающаяся в непрерывном охлаждении расплава и роста вследствие этого вязкости, в значительной степени влияет на снижение скорости заполнения.

Для некоторых термопластичных полимеров и резиновых смесей были получены аналитическим путем зависимости между среднерасходовой скоростью заполнения формы $\overline{V}_з$, геомет-

рическими параметрами полости (длиной L, высотой $\bar{d}$), свойствами материала (коэффициентом температуропроводности a, вязкостью $\eta=f(\dot{\gamma}, T)$ и параметрами процесса (давлением $p_ф$, температурой стенки формы T_w, температурой материала на входе в форму $T_л$). Например, для аморфных полимеров указанная зависимость была представлена в виде

$$\bar{V}_з=\left[\frac{p_ф\bar{d}^{n+1}}{kL\,(\eta j)^n}\right]^{1/n} \qquad (5.22)$$

где k — численный коэффициент; j — параметр, характеризующий изменение вязкостных свойств расплава при изменении температуры от $T_л$ до T_w; увеличение j в 2,5—3 раза по сравнению с его первоначальным значением соответствует достижению предельной длины затекания $L_{макс}$.

Формула для вычисления параметра j имеет вид

$$j=\frac{1}{L}\int_0^L \exp\left\{\frac{b_j}{T_л-T_c}\left[\exp\left(-10\,\frac{a}{\bar{d}}t_x\right)-\frac{T_c-T_w}{T_л-T_w}\right]^{-1}\right\}dx \qquad (5.23)$$

где $b_j=E/R$ [см. формулу (1.13)]; T_c — температура стеклования; t_x — текущее значение времени заполнения.

Время заполнения формы $t_з$ может быть определено из формулы вида

$$t_з=0{,}23\,\frac{\bar{d}^2}{a}\lg\left(0{,}5+\frac{T_л-T_w}{T_c-T_w}\right) \qquad (5.24)$$

Объемная скорость впрыска $Q_р$ при времени заполнения $t_з$, рассчитанном по формуле (5.24), определяется выражением

$$Q_р=v_0/t_з \qquad (5.25)$$

где v_0 — максимальный объем впрыска.

Решения аналогичных задач для резиновых смесей и реактопластов, выполненные численными методами с применением ЭВМ, приведены в литературе.*

Определение вида режима заполнения ($Q_р=\text{const}$) или $p_ф=\text{const}$) проводится путем подсчета общего перепада давления, возникающего при изготовлении конкретного изделия и сравнения его с номинальным перепадом $\Delta p_{общ}$, рассчитываемым по формуле

$$\Delta p_{общ}=p_{нл}-p_к=(D_п/d_ч)^2\cdot p_г \qquad (5.26)$$

где $p_к$ — давление в конце полости формы, обычно равное нулю; $D_п$ и $d_ч$ — диаметр поршня гидроцилиндра и червяка соответственно; $p_г$ — давление в гидроцилиндре впрыска.

* *Басов Н. И. и др.* Интенсификация литья под давлением реактопластов и резиновых смесей. Л.: Химия, 1980. 128 с.

Сначала принимается, что процесс заполнения происходит в наиболее технологически желательном режиме $Q_р=\text{const}$ (режим I), и подсчитывается общий перепад давления $\Delta p_{общ\,I}$, возникающий при литье данного изделия в этом режиме:

$$p_{нлр}-p_к=\Delta p_{общI}=\Delta p_ц+\Delta p_c+\Delta p_{лI}+\Delta p_{фI} \qquad (5.27)$$

где $p_{нл\,р}$ — расчетное значение необходимого номинального давления, реализуемого механизмом инжекции при литье данного изделия в режиме $Q_р=\text{const}$; $\Delta p_ц$ и $\Delta p_ф$ — перепады давления в цилиндре и сопле соответственно; $\Delta p_{лI}$ и $\Delta p_{фI}$ — перепады давления в литниковой системе и полости формы в режиме заполнения $Q_р=\text{const}$ соответственно.

Если давление $p_{нлр}$, необходимое для заполнения полости литьевой формы с конкретными геометрическими размерами, меньше номинального давления литья $p_{нл}$, получаемого на литьевой машине и выбираемого по ее паспортным данным, то заданные при вычислении $\Delta p_{л\,I}$ и $\Delta p_{ф\,I}$ по формулам (5.16) и (5.18) значения $T_л$ и $Q_р$ считаются выбранными правильно.

Если значение $p_{нлр}$ превышает $p_{нл}$, то для обеспечения формования полимера в режиме $Q_р=\text{const}$ заданные параметры $T_л$ и $Q_р$ следует откорректировать или выбрать более низковязкую марку материала. При этом следует иметь в виду, что для расплава термопласта температура $T_л$ не должна превышать значения $T_{рз}$ — температуры термического разложения расплава в течение цикла литья. Для расплава реактопласта или резиновой смеси при данной $T_л$ время заполнения формы $t_{з\,I}$ не должно быть больше t^* — времени пребывания материала в вязкотекучем состоянии.

При невозможности обеспечения режима литья $Q_р=\text{const}$ (при $p_{нлр}>p_{нл}$) определяют перепад давления $\Delta p_{ф\,II}$, образующийся при достижении в гидросистеме впрыска установленного давления литья:

$$\Delta p_{фII}=\Delta p_{общ}-\Delta p_ц-\Delta p_c-\Delta p_{лI} \qquad (5.28)$$

Расчет значений $Q_р$ и $V_з$ при $\Delta p_{ф\,II}=p_ф-p_к=\text{const}$ проводится по формулам типа (5.22), (5.24), (5.25).

Давление $p_ф$, как это видно из формулы (5.22), должно обеспечивать удовлетворительное заполнение формы при изготовлении изделия с наименьшей для данной весовой категории изделий толщиной стенки $\bar{d}$ и максимальными путями затекания L. Вследствие многообразия и сложности конфигурации отливаемых изделий аналитический учет геометрического сопротивления полости формы [коэффициент k в (5.22)] и, следовательно, расчет давления $p_ф$ по этому уравнению представляют значительные трудности. Практикой установлены максимальные значения $p_ф$. При изготовлении толстостенных изделий из термопластов оно составляет 20—40 МПа, изделий со средней толщиной стенки — 40—60 МПа, тонкостенных — 70—100 МПа. Для реактопластов и резиновых смесей эти значения могут быть увеличены на 30—40%.

5.4.3. Пластикационная производительность

В процессе пластикации сырьевого материала при литье под давлением осуществляется периодическое приготовление дозы расплава полимера для последующего его формования. Полимерный материал переводится в состояние расплава путем плавления за счет передачи тепла от стенок нагревательного цилиндра, а также вследствие диссипации энергии деформирования расплава и гранул в пластикационном цилиндре. Нагревание полимера при пластикации чаще всего сопровождается механической гомогенизацией расплава. Доза подготовленного к впрыску расплава должна быть однородной по распределению температуры и плотности материала по массе, а в случае пластикации термореактивных материалов — и по степени протекания реакции отверждения (вулканизации) в массе дозы.

Технологическими параметрами процесса пластикации являются температура, до которой нагревается материал, и продолжительность нагрева. Температура нагрева при пластикации $T_п$ с целью улучшения формуемости расплава должна быть возможно более высокой. Однако в случае переработки реактопластов и резин сумма продолжительности пребывания материала в пластикационном цилиндре $t_п$ при температуре $T_п$ и продолжительности заполнения формы $t_з$ должна быть меньше времени плато вязкости t^*, т. е.

$$t_п + t_з < t^* \qquad (5.29)$$

При поршневой или червячной пластикации продолжительность пластикации дозы расплава и его температура не могут быть регулируемы непосредственно, а устанавливаются соответствующим набором регулируемых параметров оборудования. Для обоих видов пластикации одним из таких параметров является температура стенки цилиндра у сопловой части. Температура дозы расплава, подготовленной способом червячной пластикации, кроме того, зависит и от частоты вращения червяка $N_ч$, давления в сопловой части (давления подпора $p_{пл}$ при пластикации), куда подается нагнетаемый червяком материал, а также от геометрии червяка (глубины канала нарезки, длины червяка). Увеличение частоты вращения и давления подпора усиливает диссипативные тепловыделения на поверхностях контакта расплава с червяком и в объеме расплава и повышает температуру $T_п$ в среднем на 15—20 К.

Операция пластикации и дозирования расплава может осуществляться в период времени $t_{пл}$, когда поршень (червяк) не передает на перерабатываемый материал давление литья $p_л$ для осуществления впрыска и выдержки под давлением. С учетом (5.7) $t_{пл}$ равно

$$t_{пл} = t_{охл} + t_р + t_с + t_п \qquad (5.30)$$

При этом производительность узла пластикации $Q_п$ (кг/ч) составляет

$$Q_п = (\rho_р v_0 / t_{пл}) \cdot 3600 \qquad (5.31)$$

где $\rho_р$ — плотность расплава, кг/м³; v_0 — объем дозы расплава, м³.

Продолжительность процесса поршневой пластикации $t_{пл}$ может быть установлена при рассмотрении задачи о контактном нагреве материала в виде цилиндрического тела с нестационарным температурным полем:

$$t_{пл} = \mathrm{Fo}\,(R_т^2/a) \qquad (5.32)$$

здесь Fo — значение критерия Фурье, устанавливаемое как функция $\mathrm{Fo} = f[(T_п - T_0)/(T_ц - T_0)]$ (см. с. 63), где $T_п$ — температура пластикации — температура материала в центре канала торпеды (поз. *14* на рис. 5.2); T_0 — начальная температура материала; $T_ц$ — температура стенки цилиндра ($T_ц - T_п = 20$ К); $R_т$ — радиус отверстия в торпеде, м; a — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Длительность процесса набора дозы при червячной пластикации пропорциональна объему дозы, а также зависит от частоты вращения червяка, давления подпора и геометрии червяка. Для высоковязких материалов (резин, реактопластов) время набора дозы очень слабо зависит от вязкости материала и его теплофизических свойств. Существенное влияние оказывают сыпучесть и насыпная плотность материала, так как именно эти свойства определяют условия захвата материала из загрузочного устройства витком нарезки червяка и массовую производительность в зоне загрузки.

Расчет производительности червячного пластикатора сводится к определению массовой или объемной производительности процесса движения расплава в винтовом канале $Q_м$. Для обеспечения стабильности литьевого цикла должно выполняться условие $Q_м \geqslant Q_п$. Для расчета производительности при переработке термопластов и резиновых смесей можно воспользоваться формулой (4.55), а при переработке реактопластов — совместным решением уравнений (4.127), (4.128) и (4.102) с учетом допущений, представленных в разд. 4.7. Расчет мощности, затрачиваемой на перемещение порошкообразного или гранулированного материала по каналу нарезки червяка в зоне питания (загрузки) проводится по формуле (4.28). Мощность, затрачиваемая на сдвиговое деформирование и создание перепада давления в зоне пластикации при переработке термопластов и резиновых смесей, определяется по формулам (4.91), (4.92) и (4.97). Мощность, расходуемая на пластикацию реактопластов, может быть вычислена по формуле (4.131).

5.4.4. Параметры, связанные с габаритами формуемого изделия

К числу важнейших параметров механизма запирания формы литьевой машины относится *номинальное усилие запирания формы* $P_з$ и характеристики, связанные с геометрическими раз-

мерами формующего инструмента: *ход подвижной плиты, минимальная и максимальная высота устанавливаемой формы* и *расстояние между колоннами в свету* по вертикали и горизонтали.

Усилие, возникающее в полости формы в процессе формования изделия, не должно превышать усилия запирания формы $P_з$, так как это приводит к образованию облоя и изменению размеров изделия, что особенно недопустимо для изготовления изделий с повышенной точностью размеров.

Необходимое усилие запирания (смыкания) формы может быть определено по следующему соотношению:

$$P_з = p_{ср} S_л N_г k_л k_п \qquad (5.33)$$

где $p_{ср}$ — среднее давление в полости формы; $S_л$ — максимально допустимая площадь отливки, равная площади проекции изделия на плоскость, перпендикулярную направляющим колоннам; в случае серийно выпускаемого оборудования для литья термопластов выбор $S_л$ может быть проведен по следующим данным:

Объем отливки, см³	8	16	32	63	125	250	500	1000
$S_л$, см²	35	60	100	200	350	600	1000	1800

$N_г$ — гнездность формы; $k_л$ — коэффициент, учитывающий площадь (в плане) литниковой системы ($k_л = 1{,}1 \div 1{,}2$); $k_п$ — коэффициент, учитывающий потери усилия смыкания из-за потерь на трение в уплотнениях гидроцилиндра, в механизмах прессовой части и из-за неточности изготовления плоскостей смыкания полуформы ($k_п = 1{,}2$).

Ввиду того, что при литье реактопластов и резин давление в полости формы значительно больше, чем при литье термопластов, максимально допустимая площадь литья при переработке этих материалов уменьшается на 12—15%.

Среднее давление в полости формы при литье термопластов на стадии выдержки под давлением $p_{ср}$ (МПа) может быть вычислено по эмпирической зависимости

$$p_{ср} = p_ф (0{,}07/K + 0{,}045K + 0{,}72) \qquad (5.34)$$

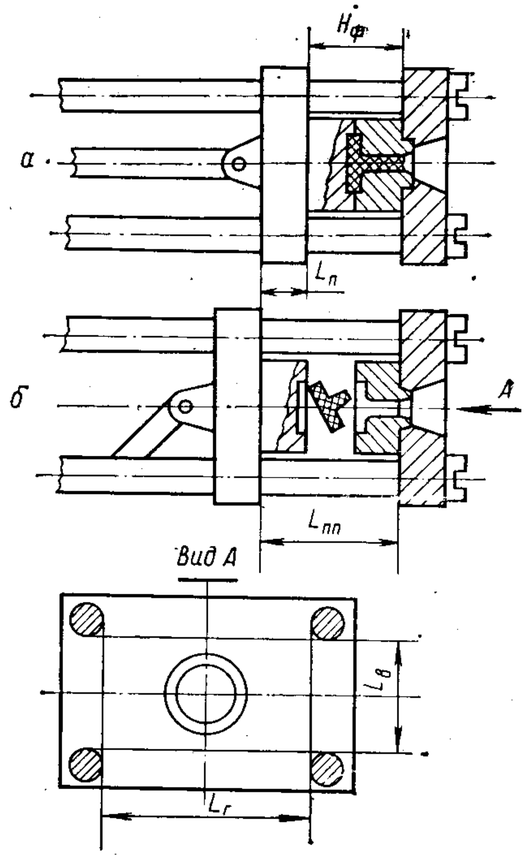
где $p_ф$ — давление на входе в форму в конце этапа заполнения формы; K — эмпирический коэффициент, зависящий от размеров формующей полости (длины L и периметра поперечного сечения полости формы П) и температуры расплава $T_л$; $K = (L/П)(170/T_л)^4$.

Для термопластов значение $p_{ср}$ обычно бывает равным 40—80 МПа.

Для расплавов реактопластов и резин максимальное давление в полости формы реализуется не на стадии выдержки под давлением, а на стадии отверждения (вулканизации) изделия. Поэтому расчет по зависимости (5.34) для этих материалов не правомерен. Можно рекомендовать воспользоваться данными, полученными экспериментальным путем для реактопластов и резиновых смесей: $p_{ср} = 30$—60 МПа.

Усилие раскрытия формы $P_р$ после окончания процесса получения изделия зависит от остаточного давления в полости

Рис. 5.12. К определению размеров механизма запирания формы:
а — форма сомкнута; *б* — форма раскрыта.



формы, адгезии полимера к поверхности полости и степени шероховатости этой поверхности. Для определения $P_р$ можно воспользоваться соотношением, полученным из анализа экспериментальных данных:

$$P_р = 0{,}1 P_з \qquad (5.35)$$

Определение усилия выталкивания изделия проводится по методике, изложенной в разд. 3.2.1 для процесса прессования.

Выбранная площадь литья $S_л$ определяет размеры плит механизма смыкания формы и расстояние в свету между колоннами по горизонтали $L_г$ и вертикали $L_в$ (рис. 5.12). Эти размеры выбираются аналогично размерам плит гидравлического пресса.

Наибольшая высота оформляющих плит литьевой формы $H_ф$ (см. рис. 5.12) равна

$$H_ф = H_и / k_и \qquad (5.36)$$

где $H_и$ — высота изделия; $k_и$ — коэффициент, учитывающий толщину стенок инструмента ($k_и = 0{,}4 \div 0{,}6$).

Ход подвижной плиты $L_п$ определяется по формуле

$$L_п = k_ф H_и \qquad (5.37)$$

где $k_ф$ — коэффициент, зависящий от объема впрыска v_0 (при $v_0 = 8$ см³ $k_ф = 1{,}8$; при $v_0 = 1000$ см³ $k_ф$ увеличивается до 2,15).

Наибольшее расстояние между плитами $L_{пп}$ рассчитывается по уравнению

$$L_{пп} = L_п + H_ф \qquad (5.38)$$

5.4.5. Стандартизованные значения параметров

Основные параметры и размеры выпускаемого в СССР литьевого оборудования стандартизованы. ГОСТ 10767—71 определяет эти параметры для однопозиционных машин с червячной пластикацией для литья под давлением термопластичных и термореактивных материалов. Эти параметры сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Основные параметры литьевого оборудования

Наименование параметров и размеров	Значения по ГОСТ 10767—71												
Механизм запирания форм													
Номинальное усилие запирания формы, кН (тс)	63 (6,3)	125 (12,5)	250 (25)	500 (50)	1000 (100)	1600 (160)	2500 (250)	4000 (400)	6300 (630)	10 000 (1000)	16 000 (1600)		
Ход подвижной плиты при наибольшей высоте формы, мм	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250		
Высота формы, мм													
наибольшая	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250		
наименьшая	100	110	125	140	160	200	250	320	400	500	630		
Расстояние между колоннами в свету, мм													
горизонтальное	160	200	250	320	400	500	500	630	800	1000	1250		
вертикальное	—	—	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250		
Наименьшее время запирания и раскрытия формы, С	1,2	1,7	2,2	3,0	4,0	5,3	7,1	9,5	13,0	19,0	27,0		
Механизм пластикации													
Номинальный объем впрыска за цикл, см³	8	16	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
исполнение I	5,6	11	22	48	95	190	380	750	1500	3000	6000		
исполнение II	11	22	45	85	170	340	670	1320	2650	5300	10 600		
исполнение III													
Номинальное давление литья, МПа	112	112	112	132	132	132	132	132	132	132	132		
исполнение I	160	160	160	180	180	180	180	180	180	180	180		
исполнение II	80	80	80	100	100	100	100	100	100	100	100		
исполнение III													

Исполнение механизмов пластикации I, II, III отличаются конструкцией и геометрическими параметрами червяков. Наибольший диаметр червяка в конструкции исполнения I, наименьший — в конструкции исполнения III.

5.5. КОНСТРУКЦИИ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН

Машины для литья под давлением принято классифицировать по целому ряду параметров и признаков. Основным классификационным параметром является максимальный объем впрыскиваемого материала за один цикл (см. табл. 5.1). Кроме того, литьевые машины подразделяют по принципу действия механизма пластикации и впрыска (*поршневые, червячно-поршневые* и т. д.), по виду привода (*механические, гидравлические, гидромеханические*), по числу пресс-узлов (*одно-* и *многопозиционные*), по типу перерабатываемых материалов и т. д. Универсальность машины в основном определяется экономическими соображениями. Так как срок эксплуатации одной машины обычно превышает продолжительность изготовления серии изделий, параметры литьевого оборудования должны выбираться не из условия изготовления одного конкретного изделия, а для усредненного ассортимента изделий с определенным объемом отливки.

5.5.1. Взаимное расположение механизмов пластикации — впрыска и запирания формы

По взаимному расположению осей механизмов пластикации — впрыска и запирания формы литьевые машины подразделяются на *горизонтальные, вертикальные* и *угловые* (рис. 5.13). Такое различие в компоновке оборудования вызвано рядом факторов: технологическими требованиями, размерами и конфигурацией изделий, требованиями автоматизации производства, экономии производственных площадей.

Наибольшее распространение получили машины горизонтального типа (рис. 5.13, *а*), в которых оси механизмов пластикации — впрыска *1* и запирания формы *2* расположены горизонтально. Эти машины выгодно отличаются удобством обслуживания и простотой осуществления автоматического режима работы, так как при такой компоновке не требуется оснащение агрегата механизмом для съема готовых изделий (изделие выпадает из полости формы в подставленный поддон после выталкивания). К недостаткам этого типа компоновки относится потребность в значительных производственных площадях для размещения этих машин.

Производство и применение машин вертикального типа (рис. 5.13, *б*) вызвано необходимостью получения армированных изделий. Машины с вертикальной компоновкой отличаются горизонтальной плоскостью разъема форм, что удобно для ус-

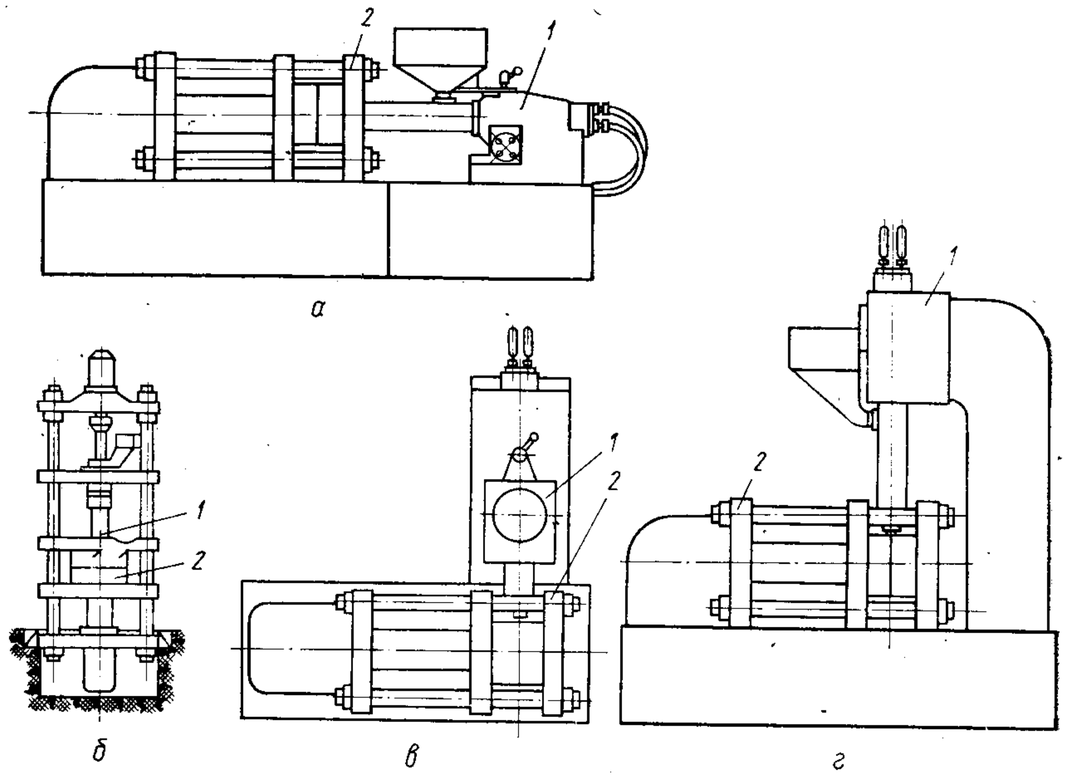


Рис. 5.13. Схемы компоновок литьевых машин:
а — горизонтальная; *б* — вертикальная; *в, г* — угловая;
1 — механизм пластикации — впрыска; *2* — механизм запирания формы.

тановки армирующих элементов отливки. Недостатком этих машин является необходимость их оснащения дополнительными кинематически сложными приспособлениями для удаления готовых изделий. С увеличением мощности таких машин значительно возрастает их высота; это усложняет их обслуживание и заставляет увеличивать высоту производственных помещений.

Угловые литьевые машины могут выпускаться с горизонтальной (рис. 5.13, *в*) и вертикальной (рис. 5.13, *г*) компоновкой под прямым углом. Эти машины сочетают в себе достоинства горизонтальных и вертикальных машин. Кроме того, машины такой компоновки выгодно использовать для литья крупногабаритных изделий в том случае, если требуется впрыск расплава не в центральную, а в периферийную часть полости формы.

5.5.2. Принцип агрегатирования механизмов

При создании литьевого оборудования, как и других видов машин для переработки полимеров, широко используется принцип агрегатирования, т. е. максимально возможной функциональной независимости каждого из основных механизмов технологической линии. Агрегатирование способствует созданию условий для унификации оборудования, а также расширяет технологические возможности оборудования, повышает его универсальность.

Применительно к литьевому оборудованию принцип агрегатирования состоит в конструктивной самостоятельности отдельных механизмов и узлов: механизмов пластикации — впрыска и запирания форм, станины, гидропривода, системы управления. Каждый из этих узлов и механизмов может применяться в комбинации с другими агрегатными узлами в зависимости от технологических требований и ассортимента выпускаемых изделий.

Принцип агрегатирования позволяет унифицировать литьевую машину, сделать экономически целесообразной переработку на базе одного агрегата различных по свойствам полимерных материалов. Универсальность машины обеспечивает возможность замены пластикационных цилиндров и червяков, горизонтальной и вертикальной установки механизмов впрыска или запирания формы, различных количественных комбинаций этих механизмов. Прессовые и инжекционные части рекомендуется устанавливать на самостоятельных станинах с раздельными, управляемыми независимо гидроприводами.

Путем присоединения к одному и тому же базовому агрегатному узлу — механизму запирания формы — различных по конструктивному исполнению механизмов пластикации — впрыска добиваются реализации на литьевой машине переработки термопластов, реактопластов и резиновых смесей. Оснащение этой литьевой машины механизмами пластикации — впрыска различного объема впрыска за цикл увеличивает технологические возможности метода.

Аналогичным образом один механизм пластикации — впрыска может комплектоваться механизмами запирания форм различных параметров, что способствует повышению площади литья $S_л$ и более полному удовлетворению требований потребителей по расширению ассортимента выпускаемых изделий.

5.5.3. Специальные литьевые машины

Основной тенденцией развития литьевого оборудования является создание универсальных, преимущественно горизонтальных литьевых машин различного объема впрыска. Однако для осуществления некоторых разновидностей метода литья под давлением, а также интенсификации технологического процесса промышленностью выпускаются и некоторые специальные виды литьевых машин. К ним относятся машины для многоцветного литья, для литья изделий из вспененных материалов и олигомерных композиций, для литьевого виброформования, многопозиционные литьевые машины.

При изготовлении двухцветных изделий на литьевых машинах с поршневой или червячной пластикацией расплава (*двухцветное литье*) реализуются в основном две схемы проведения технологического процесса, отличающиеся одновременным (по первой схеме) или последовательным (по второй схеме) впрыском расплавов разноокрашенных материалов в полость формы.

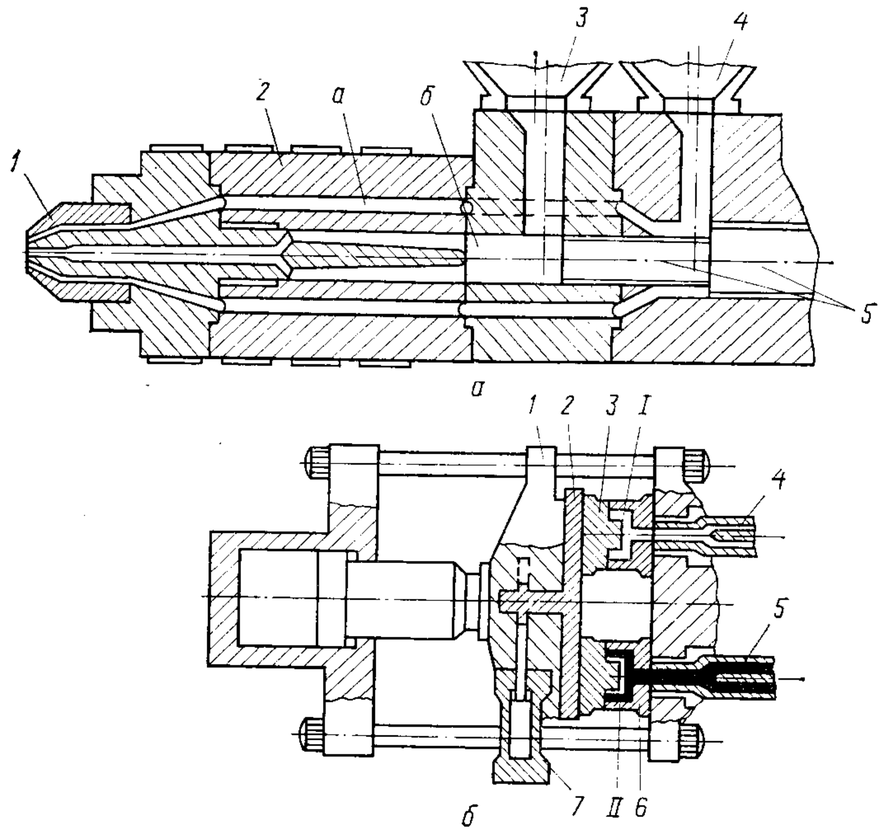


Рис. 5.14. Механизм пластикации и впрыска (*а*) и литьевая машина (*б*) для двухцветного литья:

а: *1* — сопло; *2* — нагревательный цилиндр; *3*, *4* — бункеры; *5* — дифференциальный поршень; *б*: *1* — подвижная плита механизма запирания формы; *2* — барабан; *3* — пуансон; *4*, *5* — механизмы впрыска; *6* — матрица; *7* — гидроцилиндр механизма поворота барабана.

На рис. 5.14, *а* показан поршневой механизм пластикации, работающий по первой схеме, в котором из двух бункеров *3* и *4* поступают материалы разных цветов в полости *а* и *б* нагревательного цилиндра *2*. Расплавы разных по цвету материалов впрыскиваются одновременно через сопло *1* дифференциальным поршнем *5*.

В машинах для двухцветного литья, работающих по другой схеме, предусмотрено получение двухцветных изделий из двух слоев разного цвета. Данная схема реализуется в литьевой машине, изображенной на рис. 5.14, *б*, в которой пластикация и впрыск в форму материалов разных цветов осуществляется механизмами *4* и *5*. На подвижной плите *1* механизма запирания формы укреплен барабан *2* с двумя пуансонами *3*. Поворот барабана на 180° производится гидроцилиндром *7*. В положении *I* в форме отливается заготовка одного цвета. При повороте барабана на 180° заготовка с пуансоном переносится в положение *II*. Матрица формы во втором положении *6* имеет бóльший объем, чем в первом, и свободная полость заполняется материалом другого цвета.

Механизмы пластикации и впрыска могут располагаться и таким образом, чтобы впрыск материала одного цвета осуществлялся в плоскость разъема формы, а другого (из второго цилиндра) — в перпендикулярном направлении через центральный литник.

Получение изделий из вспененных материалов может проводиться по различным технологическим схемам, отличающимся способом введения вспенивающего компонента. Этим компонентом может быть воздух, механически перемешиваемый с олигомерной композицией, которая затем отверждается при нагревании, или растворенный под давлением углекислый газ, который вспенивает материал при уменьшении давления. Пары воды и летучих веществ, образующиеся при химической реакции отверждения олигомера, или газ, выделяющийся из специального вводимого в полимер вещества (порофора) при его нагревании, также служат вспенивающими агентами при получении пенопластов.

Литьевые машины, на которых перерабатывают вспенивающиеся термопластичные материалы, конструктивно мало отличаются от обычного литьевого оборудования. Механизм пластикации и впрыска в этих машинах оснащается самозапирающимся соплом для предотвращения вытекания расплава и преждевременного снижения давления в зоне перед наконечником червяка. В отличие от обычной технологии впрыск вспенивающихся материалов проводят под более низким давлением и заполнение формы сопровождается расширением материала под действием вспенивающего агента. При контакте горячего материала с холодной поверхностью формы образуется плотная, невспененная оболочка. Степень вспенивания и пористость структуры зависят от вязкости расплава, температуры материала, скорости впрыска, времени охлаждения.

Термореактивные вспенивающиеся материалы, например полиуретаны, перерабатываются на оборудовании, в котором применяется метод заливки многокомпонентной формовочной смеси в жесткую форму. Схема метода и общий вид установки для его осуществления представлен на рис. 5.15.

Установка состоит (см. схему на рис. 5.15, *а*) из смесителя *1* с приводом *2* для приготовления смеси олигомера с вспенивающим агентом и емкости *5* с мешалкой, приводимой во вращение электродвигателем *4*, для хранения смеси катализатора с отвердителем. Дозирующие насосы *6* и *10*, приводимые в движение от электродвигателя *3* через редукторы *11*, нагнетают компоненты по трубопроводам *12* через форсунки *7* и *9* в смесительную головку *8*, откуда смесь поступает в форму *15*. На общем виде установки (рис. 5.15, *б*) видны все указанные на схеме емкости и механизмы, скомпонованные на общей станине *13*. Смесительная головка *8* вынесена на стреле *12* для удобства обслуживания форм. Механизм запирания форм представляет собой механический или гидравлический пресс. Ввиду того, что

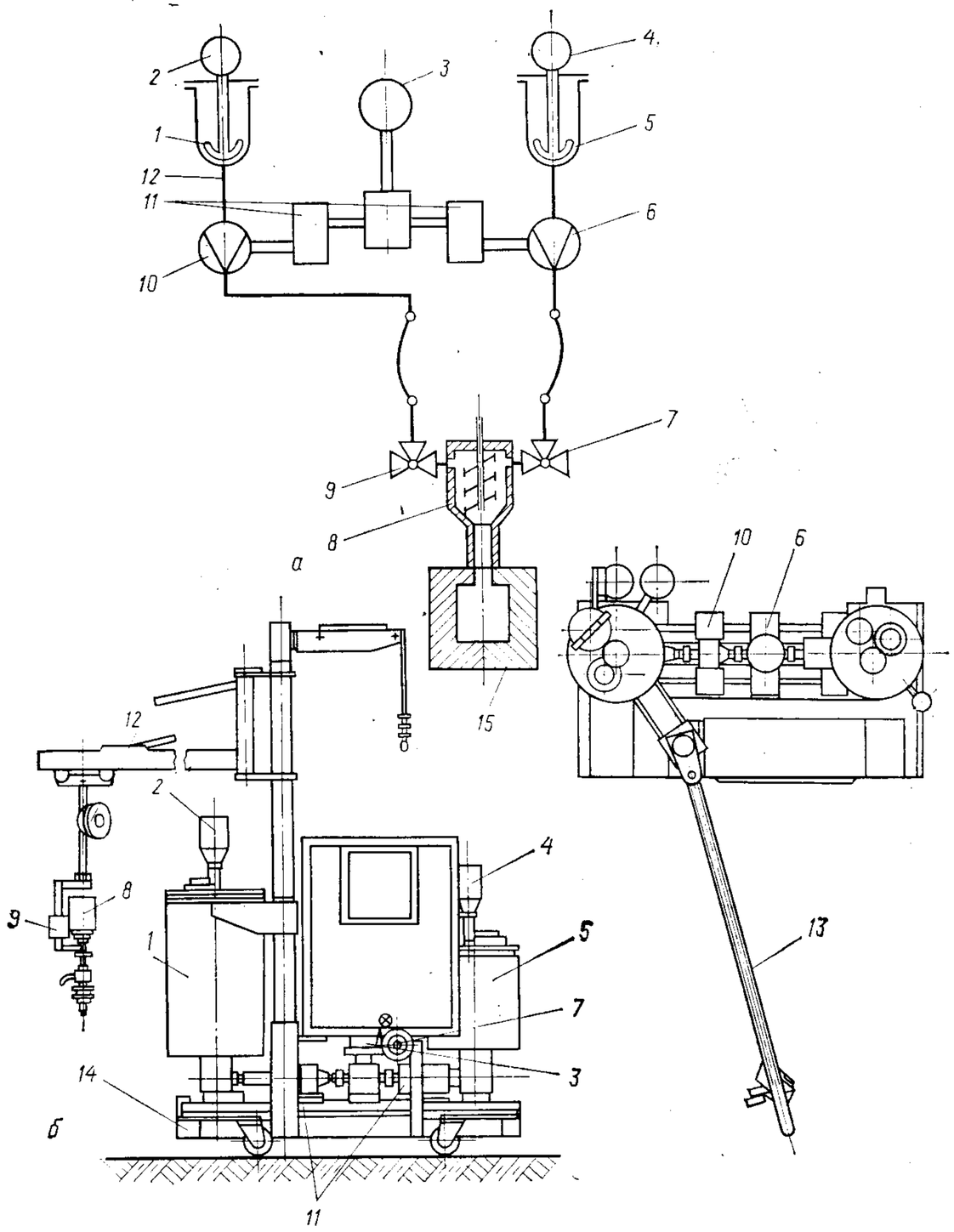


Рис 5.15. Схема (*а*) и общий вид (*б*) установки для получения изделий из вспенивающихся материалов:

1 — смеситель для приготовления смеси олигомера с вспенивающим агентом; *2—4* — электродвигатели; *5* — емкость для хранения смеси катализатора с отвердителем; *6*, *10* — дозирующие насосы; *7*, *9* — форсунки; *8* — смесительная головка; *11* — редукторы; *12* — трубопроводы; *13* — стрела; *14* — станина; *15* — форма.

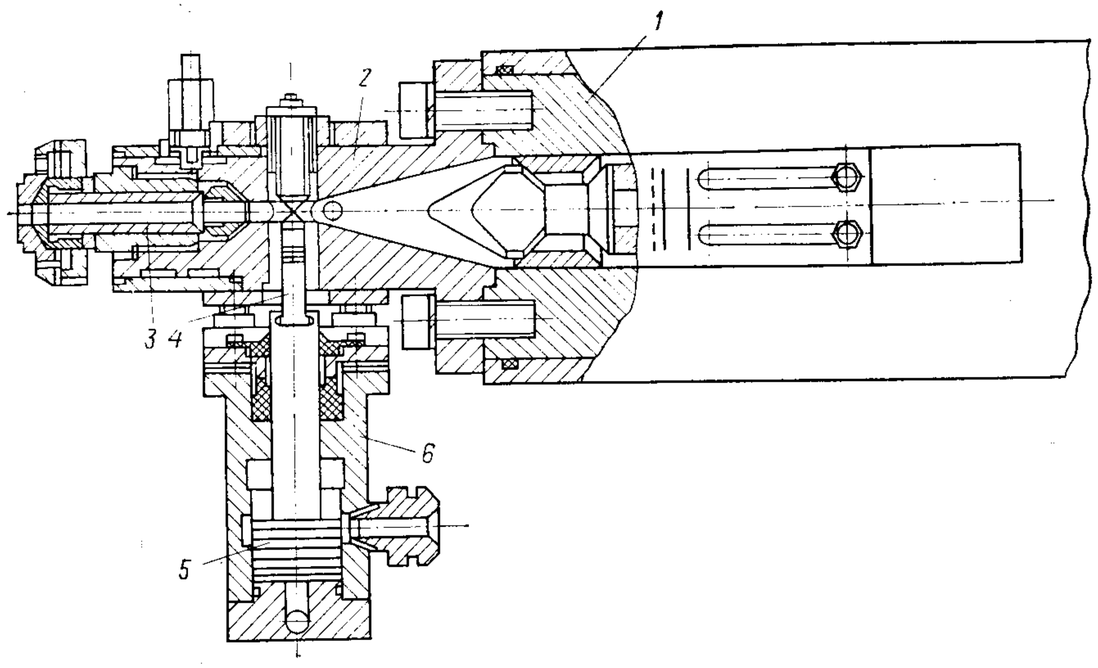


Рис. 5.16. Вибрационная приставка к механизму пластикации и впрыска литьевой машины:

1 — пластикационный цилиндр; *2* — сопло; *3* — втулка 3; *4* — вибропоршень; *5* — поршень гидроцилиндра виброприставки; *6* — гидроцилиндр виброприставки.

процесс заливки происходит под небольшим давлением (до 1—2 МПа), формы могут изготавливаться из легких сплавов, наполненных эпоксидных или полиэфирных смол.

Одним из эффективных направлений интенсификации литья под давлением является применение вибрационного воздействия, которое позволяет значительно улучшить формуемость перерабатываемого материала и повысить качество отливок. Использование метода *виброформования* основано на двух специфических эффектах, характерных для неньютоновских жидкостей — реологической нелинейности и ускорении релаксационных процессов при наложении вибровоздействия. Вследствие проявления этих эффектов среднеинтегральная скорость течения расплава существенно возрастает, что особенно важно при заполнении полостей формы с большими длинами затекания и в процессе интрузионного формования*.

При сопоставлении вибрационного и стационарного режимов литья обнаружено, что для достижения равной предельной длины затекания в одинаковых температурных условиях при виброформовании требуется значительно меньшее (на 20—30%) давление литья $p_{нл}$, чем при литье в стационарном режиме.

В настоящее время разработаны промышленные образцы литьевого оборудования для термопластов и резиновых смесей,

---

* Подробное описание сущности процесса виброформования расплавов полимеров содержится в книге: *Басов Н. И., Любартович С. А., Любартович В. А.* Виброформование полимеров. М.: Химия, 1979. 160 с.

оснащенного устройствами для передачи вибрационного воздействия на расплав на стадии формования изделия. На рис. 5.16 представлена сопловая часть механизма пластикации и впрыска такой машины, состоящая из цилиндра *1*, сопла *2* и втулки *3*. Перпендикулярно оси канала сопла *2* возвратно-поступательно движется поршень *4*, амплитуда и частота колебаний которого регулируется гидроприводом, состоящим из гидроцилиндра *6* с поршнем *5*. Колебания, возбуждаемые вибропоршнем в формуемой массе, распространяются через сопло и литниковую систему в полость формы при впрыске и выдержке расплава под давлением. Виброприставками такого типа могут комплектоваться серийно выпускаемые литьевые машины с гидравлическим приводом.

Существенного повышения производительности литьевого оборудования можно достичь применением *многопозиционных* литьевых машин. Описание конструкции и методов расчета многопозиционных литьевых машин представлено в разд. 5.7.4.

5.6. МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИКАЦИИ И ВПРЫСКА

5.6.1. Конструктивные разновидности

Назначение механизма пластикации и впрыска состоит в выполнении следующих технологических операций: а) набор, разогрев и пластикация дозы перерабатываемого материала; б) впрыск расплава и выдержка его под высоким давлением в форме до затвердевания материала в литнике. Механизмы, осуществляющие эти технологические операции, могут быть конструктивно соединены или разобщены. Но во всех случаях механизмы пластикации и впрыска могут быть подразделены на поршневые (плунжерные), червячно-поршневые, одночервячные и двухчервячные. Кроме того, в зависимости от числа цилиндров пластикации различают одно-, двух-, трех- и многоцилиндровые механизмы пластикации и впрыска.

В общем виде механизм пластикации и впрыска состоит из следующих узлов: устройство для дозирования сырья, узлы пластикации и впрыска расплава, привод возвратно-поступательного движения поршней и вращения червяков, устройство для перемещения всего механизма.

К наиболее ранним конструкциям этих механизмов относится узел впрыска *поршневого типа без предварительной пластикации* (рис. 5.17). Основной рабочей частью является нагревательный цилиндр *6*, выполненный в виде толстостенной трубы. Нагревательный цилиндр *6* крепится к передней плите *7* механизма впрыска. Через сопло *1*, связанное с цилиндром *6* при помощи насадки *2*, материал поступает в полость формы. В цилиндре *6* укреплены торпеда *4*, направляющие втулки *8*. Температура расплава измеряется с помощью термопар *3* и *5*. Зона загрузки охлаждается водой, поступающей в полость *А*, во из-

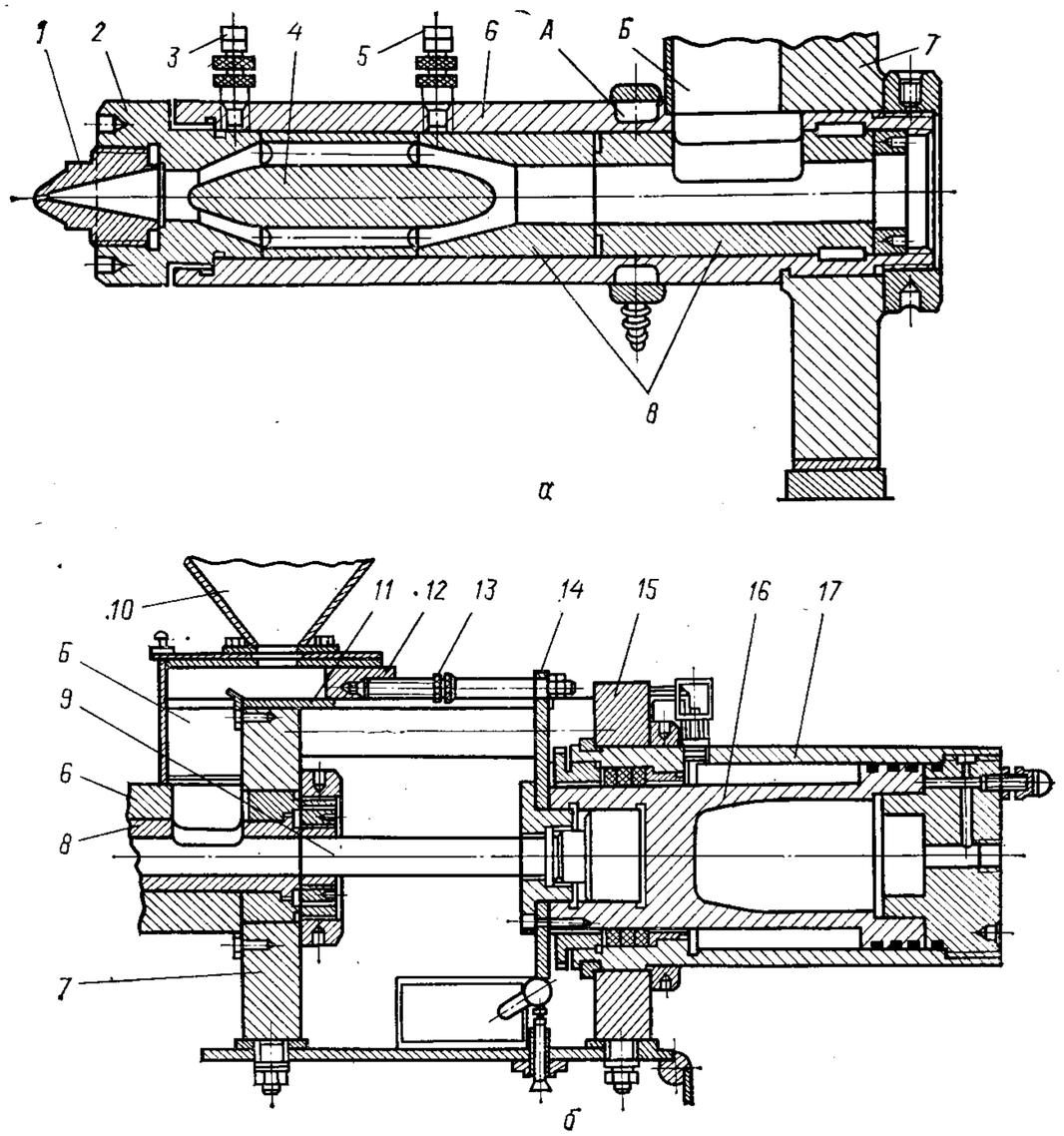


Рис. 5.17. Механизм пластикации и впрыска поршневого типа:

а — узел пластикации; *б* — узел впрыска; *1* — сопло; *2* — насадка; *3*, *5* — термопары; *4* — торпеда; *6* — нагревательный цилиндр; *7* — передняя плита механизма впрыска; *8* — направляющие втулки; *9* — поршень впрыска; *10* — бункер; *11* — корпус дозирующего устройства; *12* — поршень дозирующего устройства; *13* — регулировочные гайки; *14* — планка; *15* — задняя плита; *16* — поршень гидроцилиндра; *17* — гидроцилиндр.

бежание преждевременного плавления гранул в загрузочном отверстии *Б*.

Материал, попадающий в цилиндр *6*, проталкивается поршнем *9* через нагреваемое пространство между стенками цилиндра *6* и торпедой *4*, при этом он прогревается и перемешивается. Механизм впрыска укреплен на плитах (передней *7* и задней *15*), соединенных двумя колоннами. На передней плите установлен механизм загрузки, состоящий из бункера *10* и дозирующего устройства, включающего корпус *11* и поршень *12*. Объем дозы сырья регулируется гайками *13*. При движении влево поршня *16* гидроцилиндра *17* осуществляется осевое переме-

щение жестко связанного с поршнем *16* поршня *9* и перемещение планки *14*. Планка упирается в регулировочные гайки *13* и продвигает загрузочный поршень вперед.

Недостатком такого пластикационного устройства является отсутствие качественного перемешивания расплава и неравномерность распределения температуры в объеме дозы, в результате чего в готовых изделиях сохраняются значительные внутренние напряжения, приводящие к короблению отливок. В этих устройствах в начальный момент времени скорость впрыска очень мала, ввиду того, что поршень впрыска *9* сначала проводит уплотнение пробки материала в зоне загрузки. Поршневые устройства не обеспечивают высокой пластикационной производительности, требуют повышенных давлений впрыска и значительной мощности привода, поэтому они применяются только в литьевых машинах с малым объемом впрыска (до 63 см³/цикл).

Для частичного или полного устранения этих недостатков механизм впрыска поршневой конструкции может быть дополнен устройством для *ступенчатой предварительной червячной пластикации* материала. Такое устройство (рис. 5.18) позволяет осуществить более тщательную гомогенизацию расплава и устранить местные перегревы материала в нагревательном цилиндре.

Гранулированный материал из бункера *1* через регулируемое заслонкой отверстие в патрубке *2* попадает на вращающийся червяк *5* и продвигается вдоль цилиндра *10*. При этом материал разогревается, перемешивается и в расплавленном состоянии скапливается в камере *9* перед поршнем *8*, который под давлением расплава отходит назад. Набор дозы материала прекращается после нажима кулачка *7* на конечный выключатель *6*. Червячный пластикатор крепится на кронштейне-шарнире *4* к механизму впрыска и винтами *11* — к камере *9*. Червяк получает вращение от гидродвигателя с редуктором *3*, укрепленного на кронштейне-шарнире *4* на задней плите механизма впрыска.

Наиболее современной и рациональной является схема *червячно-поршневой пластикации в одну линию*, обеспечивающая высокую точность дозирования и высокую производительность, простоту конструкции и отсутствие мест застоя материала. Материал в червячных пластикаторах этой конструкции находится в непрерывном движении и поэтому непрерывно гомогенизируется. Прогрев материала осуществляется не только за счет теплопередачи от нагретых стенок цилиндра, но и за счет диссипативных тепловыделений при трении материала и его деформировании.

При расположении механизмов пластикации и впрыска в одну линию (рис. 5.19) червяк выполняет две функции: пластицирует и накапливает необходимую дозу расплава и впрыскивает расплав в форму. Пластикационный цилиндр *1* укреплен на корпусе *9* механизма впрыска с помощью поворотной цапфы *5*, ко-

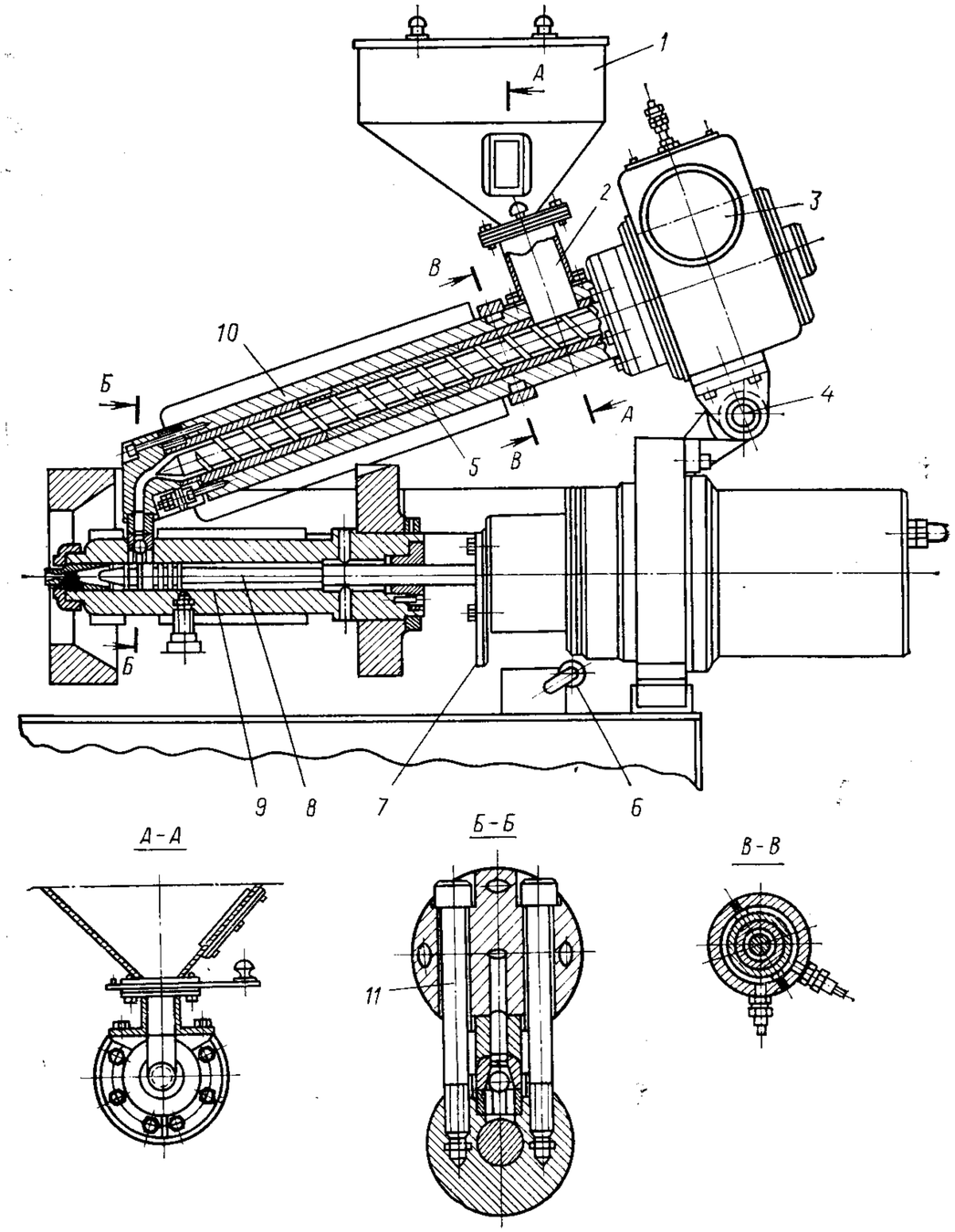


Рис. 5.18. Механизм пластикации и впрыска со ступенчатой червячной пластикацией:

1 — бункер; *2* — патрубок; *3* — гидродвигатель с редуктором; *4* — кронштейн-шарнир; *5* — червяк; *6* — конечный выключатель; *7* — кулачок; *8* — поршень; *9* — камера; *10* — цилиндр; *11* — винт.

торая в рабочем состоянии фиксируется зажимом сухарей *6*. Вращение червяка *3* осуществляется от гидродвигателя *10* через червячную передачу *11*, вал *8* и муфту *7*. Осевые нагрузки при работе червяка воспринимаются упорным подшипником *14*, установленным в поршне *15* гидроцилиндра *13*. Расплав нагре-

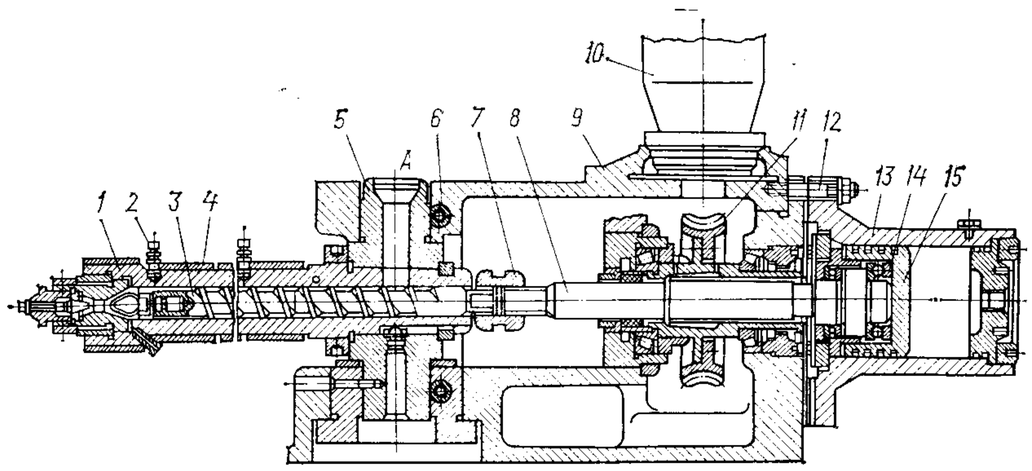


Рис. 5.19. Механизмы червячной пластикации и впрыска, расположенные в одну линию:

1 — пластикационный цилиндр; *2* — термопара; *3* — червяк; *4* — электронагреватель; *5* — поворотная цапфа; *6* — сухарь; *7* — муфта; *8* — вал; *9* — корпус механизма впрыска; *10* — гидродвигатель вращения червяка; *11* — червячная передача; *12* — шпилька; *13* — гидроцилиндр привода осевого перемещения червяка; *14* — упорный подшипник; *15* — поршень.

вается электронагревателями *4*; температура расплава контролируется датчиками термопар *2* с терморегуляторами. Шпильки *12* крепят гидроцилиндр *13* к корпусу *9*.

Гранулированный материал проходит через загрузочное отверстие *А* в зону загрузки червячного пластикатора и далее, продвигаясь по червяку при его вращении, превращается в расплав. Доза расплавленного материала скапливается в передней (сопловой) части пластикационного цилиндра *1*, а червяк под давлением, возникающим в дозе материала, отходит вправо. При подаче жидкости из гидросистемы машины в поршневую полость гидроцилиндра *13* поршень *15* передвигается влево, сообщая осевое перемещение червяку *3*, который впрыскивает дозу расплава в полость формы.

С целью улучшения процесса нагрева и гомогенизации расплава материала червячный пластикатор может быть оснащен двумя червяками, работающими аналогично двухчервячному экструдеру.

При использовании червяка в качестве поршня для впрыска расплава в большинстве случаев применяют специальные *клапанные устройства*, предотвращающие обратные токи расплава вдоль витков червяка и потери давления при впрыске. Конструкции различных клапанных устройств представлены на рис. 5.20. Устройство, показанное на рис. 5.20, *а*, хорошо зарекомендовало себя при работе с низковязкими расплавами термопластов. Материал, проходя по червяку *3* при его вращении, отжимает клапан *2* влево и проходит в сопловую часть через сверления в наконечнике *1*. При впрыске клапан *2* перемещает-

ся вправо и перекрывает пространство канала нарезки червяка для обратного потока расплава.

Клапанное устройство шарикового типа, показанное на рис. 5.20, *б*, состоит из шарика *1*, выполняющего роль обратного клапана. В момент впрыска давлением дозы расплава шарик прижимается к седлу *2* и предотвращает обратный поток.

В некоторых случаях для переработки материалов средней вязкости могут применяться специальные *наконечники 1* (рис. 5.20, *в*) с уменьшенным в два раза шагом нарезки. Такое устройство предотвращает обратный поток из-за значительного гидравлического сопротивления, оказываемого каналом наконечника червяка с малым шагом движению расплава.

В машинах для переработки высоковязких, а также отверждающихся при нагреве материалов (реактопластов, резиновых смесей) клапанные устройства не применяются, так как они затрудняют очистку канала нарезки червяка и сопловой части от остатков материала.

Сопла, применяемые в современных механизмах пластикации и впрыска, имеют конструктивные особенности в зависимости от типа перерабатываемого материала. Для низковязких материалов предназначено сопло, показанное на рис. 5.21, *а*. При отсутствии давления в цилиндре выходное отверстие под действием пружины *6* закрыто клапаном *3*. Во время впрыска расплав через каналы во втулке *1* поступает в полость гайки *2* и давит на клапан *3*. Клапан, перемещаясь вправо, сжимает через планку *4* и фланец *5* пружину *6* и открывает входное отверстие в гайке *2*. После впрыска давление в цилиндре падает, и пружина *6* возвращает клапан *3* в исходное положение, пред-

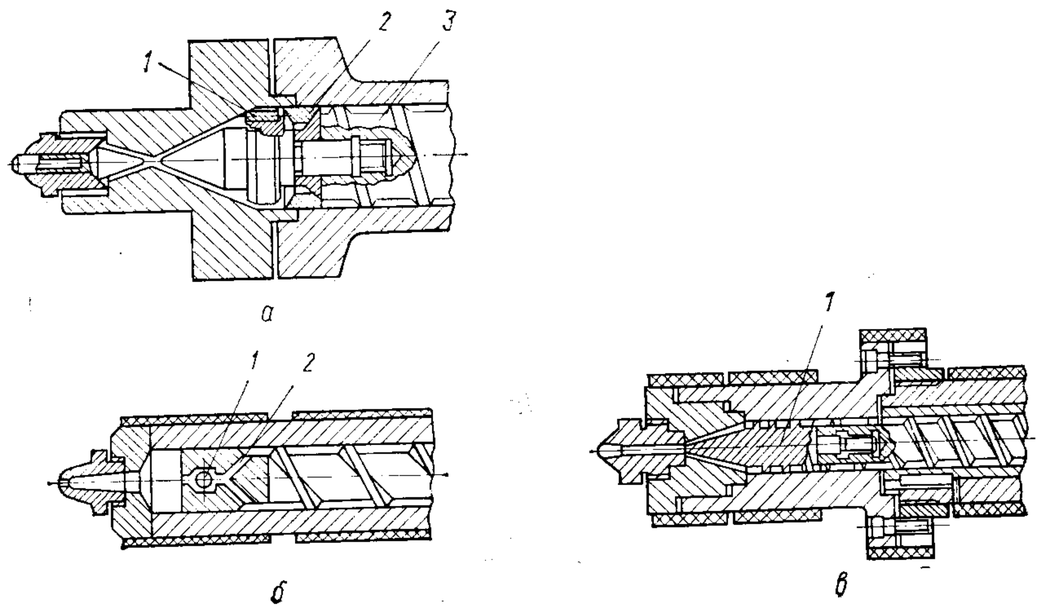


Рис. 5.20. Конструкции клапанных устройств. Пояснения в тексте.

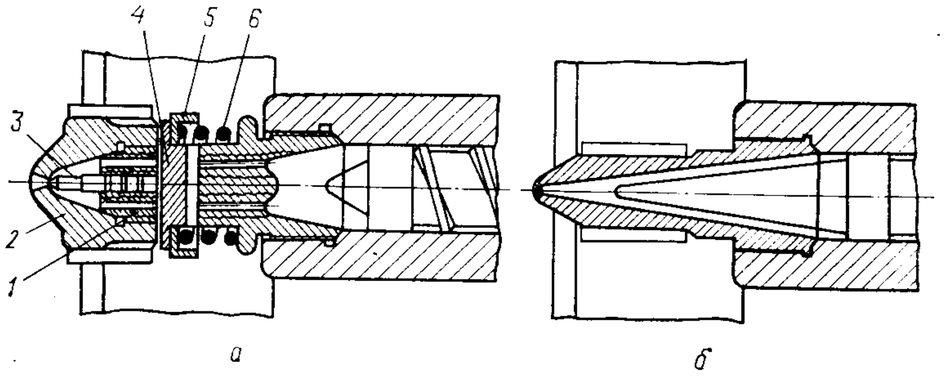


Рис. 5.21. Конструкция сопел литьевых машин для переработки низковязких (*а*) и высоковязких (*б*) материалов:
1 — втулка; *2* — гайка; *3* — клапан; *4* — планка; *5* — фланец; *6* — пружина.

отвращая вытекание расплава из сопла. Конструкция сопла для высоковязких материалов, не требующих установки каких-либо клапанных устройств, представлена на рис. 5.21, *б*.

5.6.2. Типы привода во вращение и на осевое перемещение червяка

Для *привода во вращение червяков* механизма пластикации и впрыска используются электрические и гидравлические двигатели. Привод должен обеспечивать необходимую мощность на червяке пластицирующего устройства и регулирование в определенных пределах частоты вращения червяка. Диапазон регулирования частоты вращения червяка обычно составляет от $N_{мин}=10\div15$ об/мин до $N_{макс}=150\div180$ об/мин. В червячных пластикаторах применяется ступенчатое, бесступенчатое или комбинированное регулирование частоты вращения червяка.

Ступенчатое регулирование может использоваться в литьевых машинах специального назначения, рассчитанных на применение строго определенных видов сырьевых материалов, и в случае изменения технологических параметров процесса пластикации в нешироком интервале. Ступенчатое регулирование чаще всего производится электромеханическим путем при использовании асинхронных электродвигателей переменного тока, передающих крутящий момент на червяк через редуктор со сменными зубчатыми колесами или ступенчатую коробку передач.

В приводе механизма пластикации могут быть использованы электродвигатели постоянного тока, оснащенные схемами регулирования и стабилизации частоты вращения, а также коллекторные двигатели переменного тока с бесступенчатым изменением числа оборотов.

На рис. 5.22 представлена конструкция механизма пластикации и впрыска, имеющего узел пластикации со ступенчатым регулированием частоты вращения червяка. Червяк получает вращение от электродвигателя через редуктор *1* со сменными

шестернями, шлицевый вал *9* и зубчатые колеса *3*, установленные в каретке *2*. Редуктор и электродвигатель закреплены неподвижно на станине машины, а каретка *2* перемещается вдоль шлицевого вала *9*, поэтому червяк может вращаться в любом положении (относительно оси вала *9*) узла впрыска. Шестерня *3* установлена на втулке, в которую входит шлицевый конец червяка. В расточке поршня *8* осевого перемещения червяка гидроцилиндра *6* установлен вал *7*, связанный зубчатой муфтой *5* со шлицевым концом червяка *4*. Осевые нагрузки, возникающие при пластикации и впрыске расплава, воспринимаются упорным подшипником *10*.

Конструкция привода электромеханического типа требует оснащения ее предохранительными устройствами, защищающими редуктор и электродвигатель от перегрузок.

Большинство литьевых машин имеет *бесступенчатое регулирование* частоты вращения червяка, необходимое с технической и экономической точек зрения для получения оптимальной производительности при переработке полмеров различных типов. Плавное изменение частоты вращения червяка в широком диапазоне без изменения крутящего момента достигается путем применения гидропривода.

Гидродвигатель, конструкция которого показана на рис. 5.23, состоит из следующх основных деталей: ротора *1* с поршнями *2*, барабана *3* с толкателями *4*, вала *7*, корпуса *5*, радиаль-

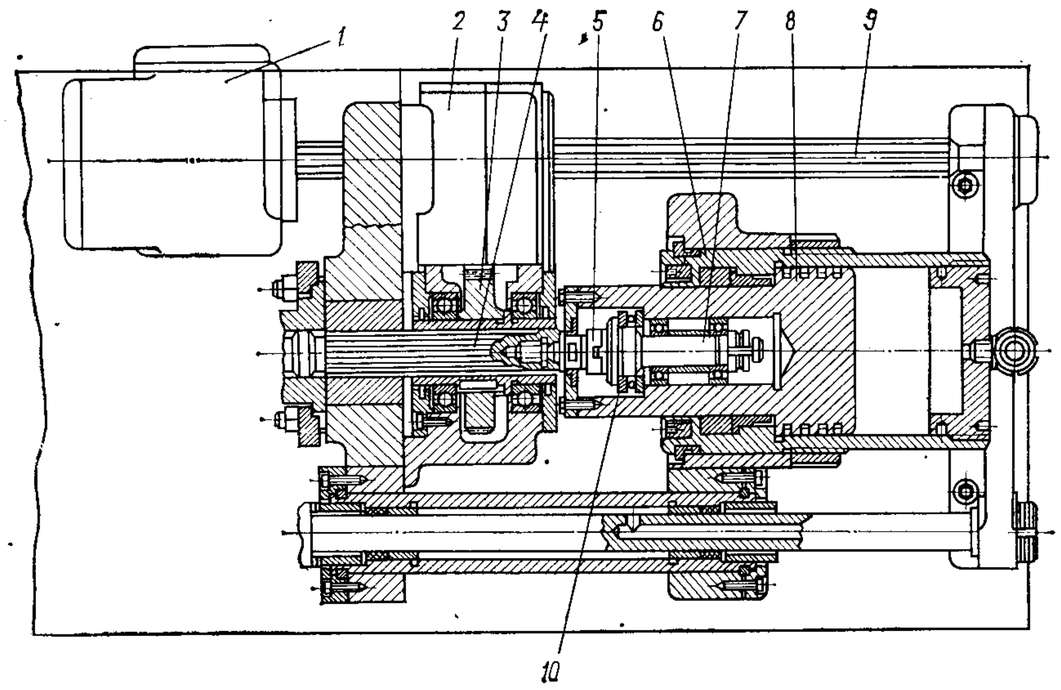


Рис. 5.22. Механизм пластикации и впрыска со ступенчатым регулированием частоты вращения червяка:
1 — редуктор; *2* — каретка; *3* — зубчатые колеса; *4* — шлицевый конец червяка; *5* — зубчатая муфта; *6* — гидроцилиндр осевого перемещения червяка; *7* — вал; *8* — поршень осевого перемещения червяка; *9* — шлицевый вал; *10* — упорный подшипник.

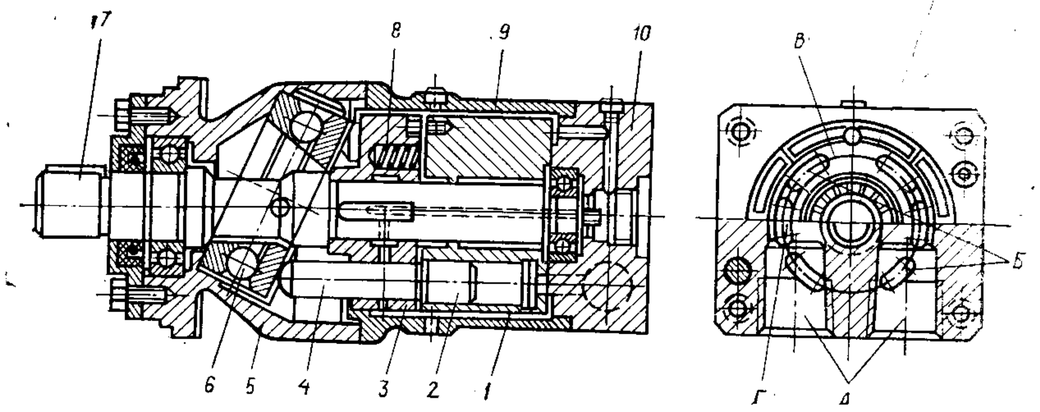


Рис. 5.23. Гидродвигатель типа МГ-153А:
1 — ротор; *2* — поршень; *3* — барабан; *4* — толкатель; *5*, *9* — корпуса; *6* — радиально-упорный подшипник; *7* — вал; *8* — пружина; *10* — опорно-распределительный диск.

но-упорного подшипника *6*, корпуса *9* и опорно-распределительного диска *10* с каналами *А* для подвода и отвода гидравлической жидкости. В барабане *3* расположены пружины *8*, которые прижимают ротор к диску *10*. Пазы *Б*, разделенные перемычками *В* и *Г*, служат для подведения к ротору масла через окна в торце ротора. При воздействии масла на поршни *2*, расположенные против пазов, толкатели *4* выдвигаются и прижимаются к подшипнику *6*. Возникающие при этом тангенциальные силы вращают толкатели вместе с барабаном *3*, валом *7* и ротором *1*. Одновременно с этим толкатели, находящиеся против кольцевого паза, соединенного со сливом, выталкивают масло в этот паз. Данный гидродвигатель работает при рабочем давлении до 5 МПа, развивая при этом частоту вращения, равную 1800 об/мин.

При проектировании механизма пластикации и впрыска гидродвигатель подбирают по необходимому крутящему моменту на валу двигателя $M_{кд}$ (Н·м), равному

$$M_{кд} = M_{кч}/(i\eta) \qquad (5.39)$$

где $M_{кч}$ — крутящий момент на валу червяка, Н·м; i — передаточное отношение редуктора; η — к. п. д. передачи ($\eta = 0{,}95$).

Мощность насоса $W_н$ (Дж/с), питающего гидродвигатель, определяется по формуле

$$W_н = p_г Q_н/\eta \qquad (5.40)$$

где $p_г$ — давление в гидросистеме, МПа; $Q_н$ — производительность насоса, м³/с; η — полный к. п. д., равный $\eta = \eta_д \eta_н$ (здесь $\eta_д$ и $\eta_н$ — к. п. д. гидродвигателя и гидронасоса соответственно).

Схема привода червяка с использованием гидродвигателя и червячного редуктора была представлена на рис. 5.19. Гидродвигатель *10* через червяк редуктора (на чертеже не показан) и червячное колесо *11* передает вращение шлицевому валу *8*, соединенному с червяком муфтой *7*. Эта конструкция относится

к типу устройств с неподвижным приводом вращения в процессе набора дозы и впрыска. Пластицирующие устройства с неподвижным приводом получили распространение при создании конструкций машин малой и средней мощности. К недостаткам такой конструкции следует отнести возникновение больших усилий трения на боковых поверхностях шлицев в процессе отхода шлицевого вала вправо при пластикации. Указанные потери мощности на трение могут быть устранены или уменьшены применением конструкций с подвижным приводом (рис. 5.24), которые используются в литьевых машинах большой мощности.

Червяк *7* получает вращение от электродвигателя *1* через электромагнитную муфту *2* и редуктор *3*. Редуктор может перемещаться по колоннам *4* вместе с червяком *7*: при наборе дозы в цилиндре *6* — вправо, при впрыске — влево. Гидроцилиндр *5* закреплен неподвижно на станине машины.

В некоторых конструкциях (рис. 5.25, *а*) гидродвигатель *2* привода во вращение устанавливают непосредственно на оси червяка *1*, что в значительной степени уменьшает габаритные размеры механизма. Конструкция, представленная на рис. 5.25, *б*, обеспечивает увеличение крутящего момента, подводи-

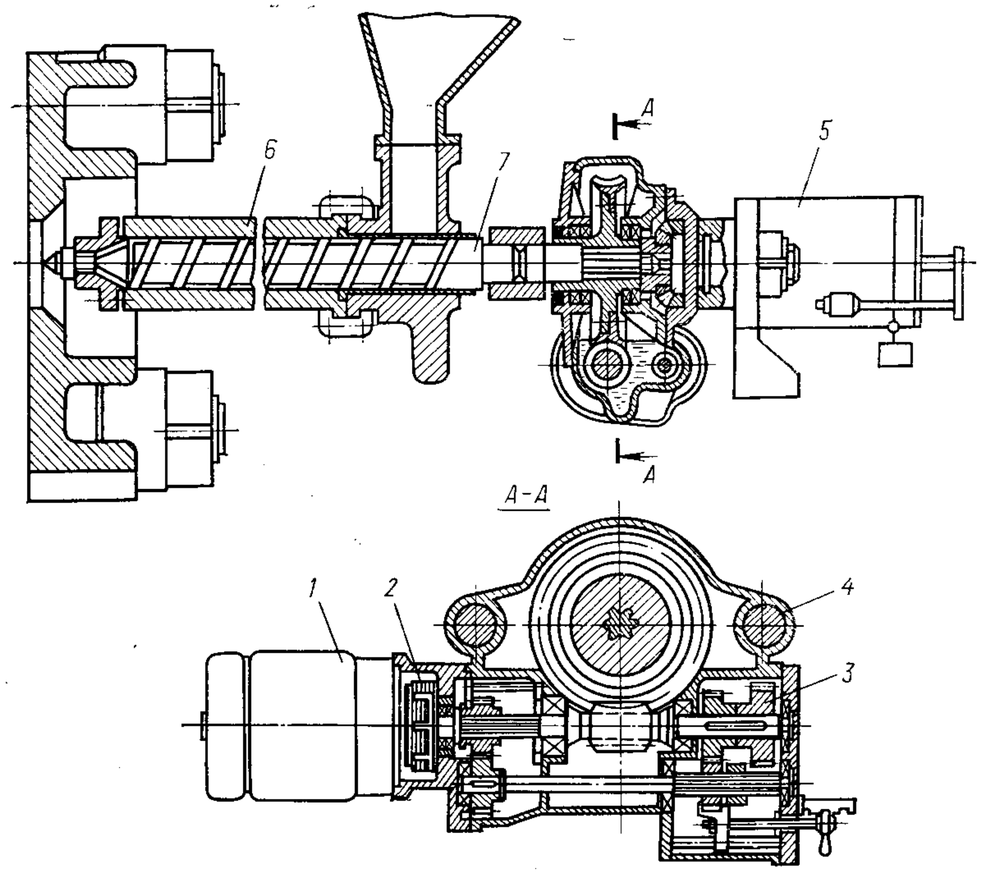


Рис. 5.24. Червячный механизм пластикации и впрыска с подвижным приводом:
1 — электродвигатель; *2* — электромагнитная муфта; *3* — редуктор; *4* — колонна; *5* — гидроцилиндр; *6* — материальный цилиндр; *7* — червяк.

мого от гидродвигателя *4* к червяку *1*, посредством редуктора *3* со сменными шестернями *2*.

Привод осевого перемещения червяка бывает, как правило, гидравлического типа. Механизм пластикации и впрыска (см. рис. 5.22) состоит из гидроцилиндра *6*, внутри которого перемещается под давлением масла поршень *8*. В проточке поршня установлены опоры *10* промежуточного вала *7*. Осевое перемещение червяка *4* с поршнем *8* вправо относительно гидроцилиндра *6* происходит под воздействием давления в дозе расплава при ее наборе.

Механизм пластикации и впрыска часто выполняется передвижным для возможности его перемещения в технологическом цикле, для смены сопла и очистки литниковой втулки. В конструкции, показанной на рис. 5.26, весь механизм перемещается по колоннам *1* гидроцилиндром *2*, который закреплен неподвижно на станине. Шток *4* поршня *3* гидроцилиндра *2* прикреплен к подвижной плите *5*. С помощью гидроцилиндра *2* можно подводить весь механизм к литниковой втулке и осуществлять отрыв литника после окончания выдержки на отверждение.

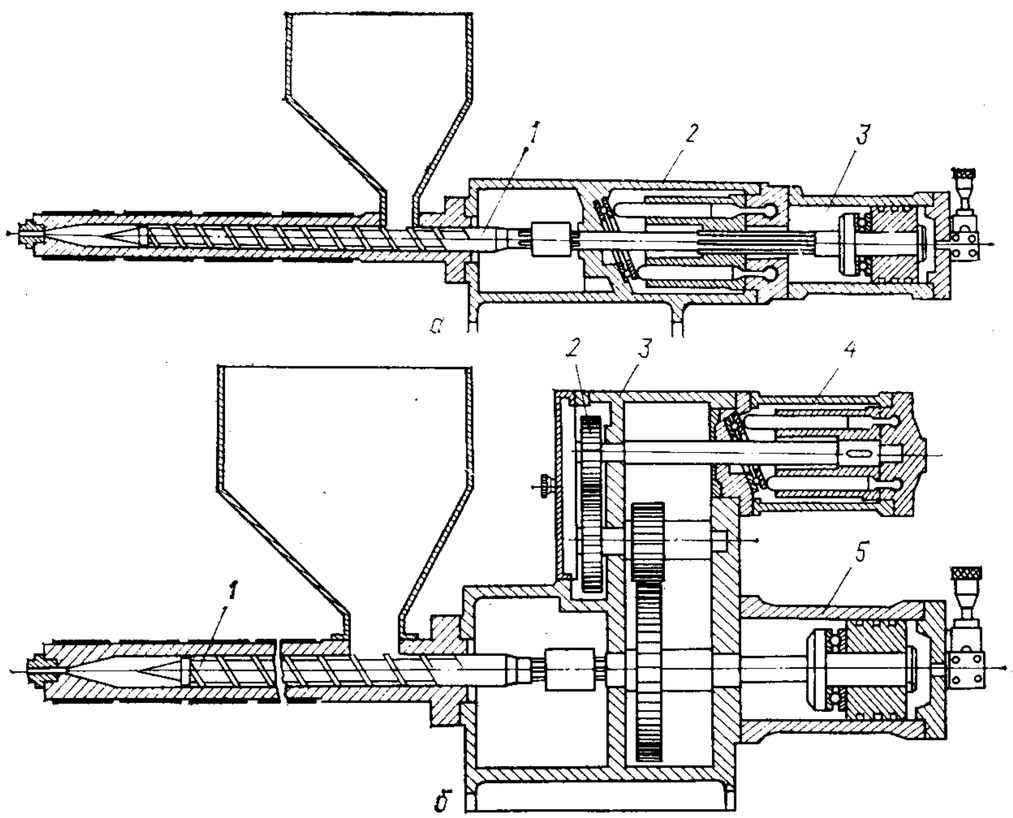


Рис. 5.25. Схемы приводов червяка с использованием гидродвигателя привода во вращение:

а — установленного непосредственно на оси червяка (*1* — червяк; *2* — гидродвигатель; *3* — гидроцилиндр осевого перемещения червяка); *б* — установленного через редуктор (*1* — червяк; *2* — сменные шестерни; *3* — редуктор; *4* — гидродвигатель; *5* — гидроцилиндр осевого перемещения червяка).

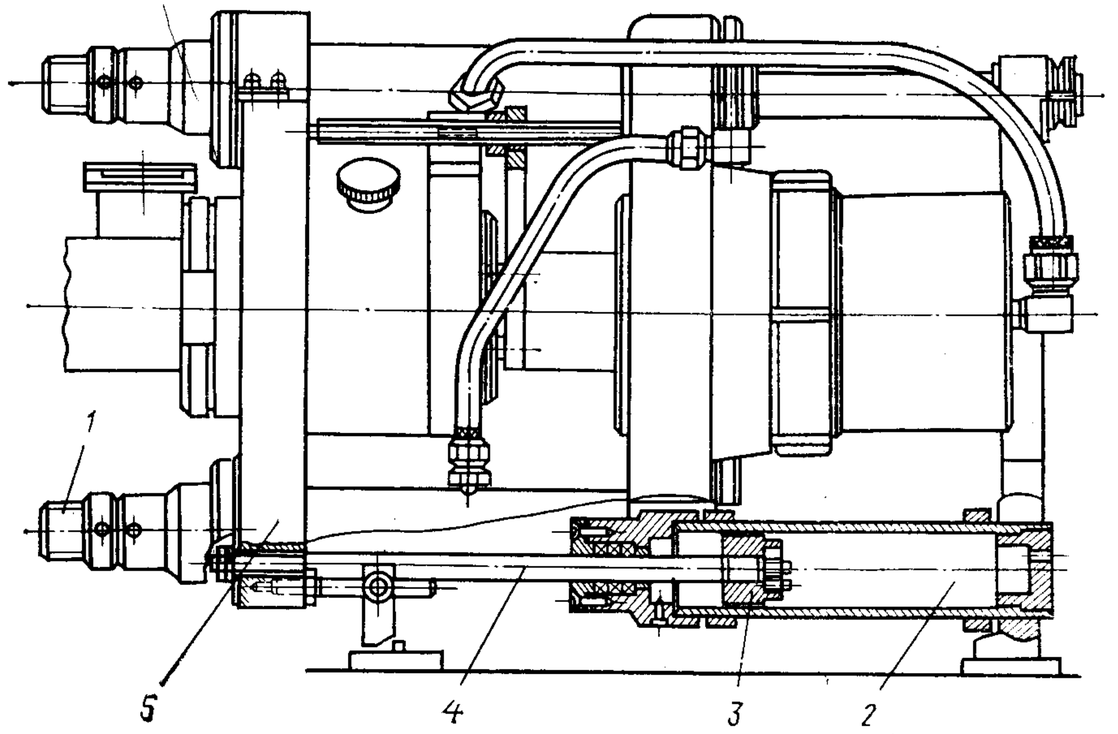


Рис. 5.26. Гидропривод перемещения механизма пластикации и впрыска:
1 — колонны; *2* — гидроцилиндр; *3* — поршень; *4* — шток; *5* — подвижная плита.

Остальные элементы гидропровода машины — гидронасосы и распределительная аппаратура — аналогичны описанным ранее в разд. 3.4.

5.6.3. Расчет основных конструктивных параметров механизмов пластикации и впрыска

Исходными данными для выполнения расчета основных конструктивных параметров механизма пластикации и впрыска являются:

— характеристики перерабатываемого материала: а) для термопластов и резиновых смесей — постоянные реологического закона m_0 и n и энергия активации вязкого течения E, для реактопластов — постоянные закона пристенного скольжения $k_{ос}$, $E_с$ и s; б) температуры стеклования $T_с$, течения $T_т$, плавления $T_{пл}$ и размягчения $T_р$; в) коэффициенты трения f, сжимаемости расплава $\varkappa$; г) коэффициент температуропроводности a, плотность расплава ρ и насыпная плотность гранулята $\rho_г$;

— параметры технологического режима пластикации (давление $p_{пл}$, температура $T_м$, частота вращения червяка $N_ч$);

— параметры процесса заполнения формы (объемная скорость заполнения $Q_р$, температуры стенки формы $T_ф$ и литья $T_л$);

— объем впрыска v_0 и геометрические размеры изделия (длина L, толщина $\bar{d}$), характерного по конфигурации и разме-

рам для круга изделий, которые предполагается изготавливать на данной машине; это изделие может иметь вид простой геометрической фигуры: плоского цилиндра (шайбы), параллелепипеда (пластины) и т. д.;

— объем и геометрические размеры литникового канала (длина $l_л$, диаметр $d_л$), который может быть использован при литье характерного изделия.

Сначала по методике, изложенной в разд. 5.4.1, определяем время цикла работы машины $t_ц$. Затем определяется номинальное давление впрыска $p_{нлр}$ по методике, изложенной в разд. 5.4.2, в режиме $Q_р = \text{const}$ путем отыскания перепада давления, реализуемого механизмом впрыска на преодоление сопротивления движению материала в полости формы, в литниковой системе и в узле пластикации. Найденное значение сравнивается с данными табл. 5.1 и выбирается значение $p_{нл}$ для данного типоразмера машины (объема впрыска) по величине большее, чем расчетное значение $p_{нлр}$.

Расчет механизмов пластикации и впрыска поршневого типа включает в себя определение наружного $D_н$ и внутреннего $D_в$ диаметров нагревательного цилиндра, диаметра $d_п$ и хода $l_п$ поршня впрыска, толщины прогреваемого слоя расплава, конструктивных размеров гидроцилиндра впрыска.

Размеры нагревательного цилиндра должны обеспечить подогрев до нужной температуры данного количества материала при заданной продолжительности цикла литья $t_ц$.

Время пребывания материала в нагревательном цилиндре $t_{пр}$ может быть оценено как

$$t_{пр} = \frac{v_ц}{v_{изд}} - t_ц < t_т \qquad (5.41)$$

где $v_ц$ — объем нагревательного цилиндра; $v_{изд}$ — объем отливки (изделия); $t_ц$ — время цикла; $t_т$ — время термостабильности полимера при температуре цилиндра $T_ц$.

Отношение $k_и = v_ц/v_{изд}$ для термопластичных материалов выбирается равным 5—8.

Геометрические размеры нагревательного цилиндра $D_в$ и l (рис. 5.27) определяются путем решения уравнения теплопроводности в условиях двухстороннего нагрева бесконечной плоской пластины толщиной 2δ. Обозначим температуру материала на входе в пластикатор T_0, температуру стенки цилиндра $T_ц$ и температуру максимального нагрева материала $T_м$. Отношение E фактического разогрева материала к теоретически возможному называется термическим к. п. д. пластикатора и равно

$$E = (T_м - T_0)/(T_ц - T_0) \qquad (5.42)$$

Для литьевых машин оптимальной производительности $E = 0{,}8 \div 0{,}85$. Задаваясь значением относительной температуры θ, равной

$$\theta = 1 - E = (T_ц - T_м)/(T_ц - T_0) = 0{,}15 \div 0{,}20$$

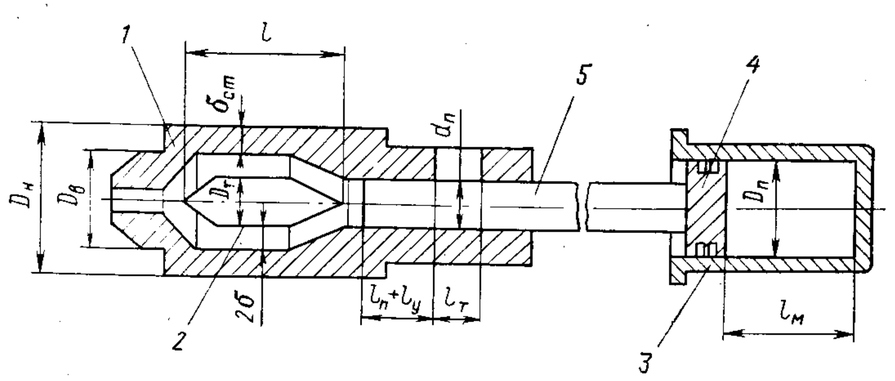


Рис. 5.27. Схема к расчету параметров механизма пластикации и впрыска поршневого типа:

1 — нагревательный цилиндр; *2* — торпеда; *3* — гидроцилиндр впрыска; *4* — поршень гидроцилиндра; *5* — поршень инжекции.

определяют значение критерия Фурье $\text{Fo} = at_{пр}/\delta_1^2 \approx 1$, по которому находят толщину $\delta_1 = 2\delta$ прогреваемого кольцевого слоя (м) материала:

$$2\delta = \sqrt{at_{пр}/\text{Fo}}$$

где a — коэффициент температуропроводности гранулята, м²/с.

Полезное тепло Q, израсходованное на прогрев материала, может быть определено как

$$Q = cG_{изд}(\Delta T/t_ц) \qquad (5.43)$$

где c — удельная теплоемкость гранулята, кДж/(кг·К); $G_{изд}$ — масса изделия, кг ($G_{изд} = v_{изд}\rho$); $\Delta T = T_м = T_0$, К.

Внутренние размеры нагревательного цилиндра $D_в$ и l находятся из совместного решения уравнения (5.41) и уравнения теплопроводности в виде

$$Q = \lambda\pi D_в l \Delta T_{ср}/(2\delta) \qquad (5.44)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; $\Delta T_{ср} = (\Delta T_н - \Delta T_к)/\ln(\Delta T_н/\Delta T_к)$ (здесь $\Delta T_н = T_ц - T_0$; $\Delta T_к = T_ц - T_м$).

Формула для расчета $D_в$ имеет вид

$$D_в = \frac{8Q\delta^3}{4Q\delta^3 - k_м\lambda\Delta T_{ср}v_{изд}} \qquad (5.45)$$

где

$$k_м = v_{мц}/v_{изд} = \pi l(D_в - 2\delta)2\delta/v_{изд}$$

($v_{мц}$ — объем материала в цилиндре).

Диаметр торпеды $D_т$ определяется как

$$D_т = D_в - 4\delta \qquad (5.46)$$

Тогда длина нагревательного цилиндра l может быть вычислена по выражению

$$l = \frac{k_м v_0}{\pi(D_в^2 - D_т^2)} \qquad (5.47)$$

При проталкивании уплотненного гранулята через переднюю (загрузочную) часть нагревательного цилиндра возникают потери на трение о стенки, которые резко возрастают с увеличением длины пробки гранулята (при отношении длины пробки $l_п$ к диаметру впрыскивающего поршня $d_п$, большем 2—2,2). Это условие определяет диаметр $d_п$.

Максимальный объем пробки гранулята $v_г$ вычисляется по уравнению

$$v_г = v_0 \rho / \rho_г \qquad (5.48)$$

где v_0 — объем впрыска машины; ρ и $\rho_г$ — плотность полимера и насыпная плотность гранулята.

С другой стороны

$$v_г = \pi d_п^2 l_п / 4 \qquad (5.49)$$

Из выражений (5.48) и (5.49) с учетом $k_п = l_п/d_п = 2 \div 2{,}2$ можно получить уравнение для расчета диаметра поршня впрыска:

$$d_п = \sqrt{4 v_0 \rho / (\rho_г \pi k_п)} \qquad (5.50)$$

Полный ход поршня $l_м$ складывается из следующих составляющих:

$$l_м = l_т + l_п + l_у \qquad (5.51)$$

Составляющая $l_т$ — это ход поршня при транспортировании гранулята (твердого полимера) в переднюю часть нагревательного цилиндра и перекрывания загрузочного отверстия:

$$l_т = l_1 + h_1$$

где $l_1 = (1 \div 1{,}5) d_п$ — длина загрузочного отверстия; $h_1 = 5 \div 7$ мм — ход поршня до и после загрузочного отверстия, необходимый для уплотнения гранул.

Составляющая $l_п$ — ход поршня при продавливании порции расплава и создании давления впрыска; $l_п$ является также длиной пробки расплава.

Составляющая $l_у$ — ход поршня при выдержке под давлением, определяемый из условия, что охлаждающееся или отверждающееся в форме изделие претерпевает усадку до 15—20%, т. е. $l_у = (0{,}15 \div 0{,}2)\, l_п$.

Расчет диаметра поршня гидроцилиндра впрыска $D_п$ может быть проведен по формуле

$$D_п = d_п \sqrt{p_{нл}/p_г} \qquad (5.52)$$

Выбор геометрических размеров и расчет гидроцилиндра впрыска и его поршня проводится по методике, изложенной в разд. 3.3.2 и 3.3.3.

Поверочному прочностному расчету подвергается нагревательный цилиндр, работающий как толстостенный сосуд под внутренним давлением, равным максимальному давлению литья $p_{нл}$.

Растяжение нагревательного цилиндра от соответствующего максимального усилия впрыска $P_в = \pi d_п^2 p_{нл}/4$ (наиболее опасный вариант, когда осуществляется ход поршня вперед при несомкнутой форме и закупоренном сопле) вызывает напряжения, по величине гораздо меньшие, чем напряжения от внутреннего давления, поэтому в расчетах их можно не учитывать.

Рёзьбы крепления сопла к нагревательному цилиндру и цилиндра к плите подвергаются поверочному расчету на изгиб и срез под действием осевой нагрузки, равной усилию затяжки резьбы. Усилие затяжки резьбы принимается обычно в 1,3 раза больше максимального усилия впрыска $P_в$.

Поршень впрыска может быть проверен на прочность при сжатии

$$\sigma_{сж} = \frac{4P_в}{\pi d_п^2} < [\sigma_{сж}] \qquad (5.53)$$

и на устойчивость

$$\sigma_у = \frac{4P_в}{\pi d_п^2} < \frac{\sigma_к}{k_{ус}} \qquad (5.54)$$

где $[\sigma_{сж}]$ — допускаемое напряжение при сжатии; $\sigma_к$ — критическое напряжение устойчивости, равное $\sigma_к = \pi^2 E/(\mu_у l_м/i)^2$ (здесь E — модуль упругости, $\mu_у l_м/i = \lambda_у$ — гибкость, $\mu_у = 2$ — числовой коэффициент, $i = d_п/4$); $k_{ус} = 1{,}8 \div 3$ — коэффициент запаса устойчивости.

Практически проверке на устойчивость подвергаются поршни при $\lambda_у > 80 \div 100$ или при отношении $l_м/d_п > 10 \div 12$.

При расчете геометрических характеристик червячных пластикаторов прежде всего следует определить диаметр червяка $D_ч$ по формуле

$$D_ч = \sqrt[3]{4 v_0/(\pi k_ч)} \qquad (5.55)$$

где $k_ч$ — отношение хода червяка при впрыске $l_ч$ к диаметру $D_ч$ ($k_ч = 1{,}5 \div 3$).

Диаметр червяка корректируют по нормализованному ряду (см. разд. 4.3) и, задаваясь значением $p_{нл}$ по табл. 5.1, определяют диаметр поршня гидроцилиндра $D_п$:

$$D_п = d_ч \sqrt{p_{нл}/p_г} \qquad (5.56)$$

При литье термопластов значение $p_{нл}$ выбирается в диапазоне от 80 до 132 МПа, при литье реактопластов и резин — от 160 до 180 МПа.

Определив значение $d_ч$, можно перейти к выбору остальных параметров червяка: его длины, степени сжатия, геометрии канала нарезки, конструкции наконечника по методике, изложенной в разд. 4.11.

Для выбора конструкции наконечников червяков и сопел нагревательного цилиндра (рис. 5.28) при работе с материалами различной вязкости и термостабильности, а также с червя-

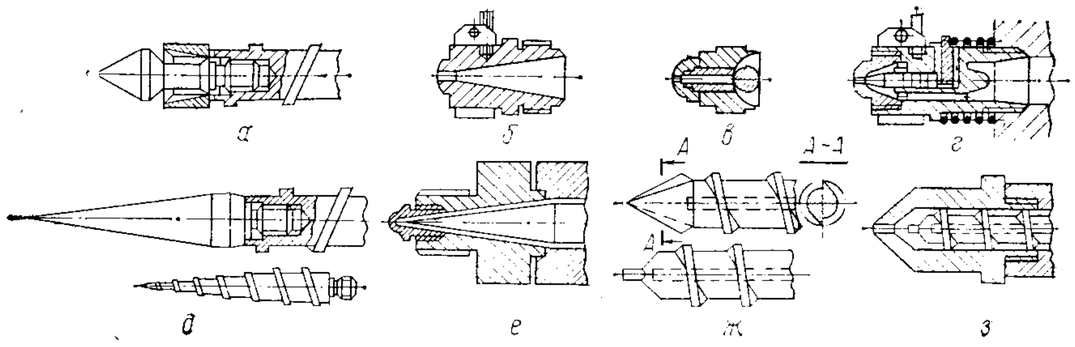


Рис. 5.28. Наконечники червяков и сопла цилиндров пластикации и впрыска. Пояснения в тексте.

ками различных конструктивных типов (группы червяков I—IV в табл. 4.2) можно руководствоваться следующими рекомендациями. Червяки группы I изготавливают с наконечником, оснащенным обратным клапаном (рис. 5.28, *а*), а пластикационные цилиндры имеют сопла конструкций, изображенных на рис. 5.28, *б* и *в*. Червяки группы II имеют тот же наконечник, что и червяки группы I, но сопло — с игольчатым клапаном (рис. 5.28, *г*). Червяки группы III оснащаются коническим наконечником (рис. 5.28, *д*) и соплом открытого типа (рис. 5.28, *е*). Для червяков группы IV может быть рекомендован наконечник с ножевыми лопастями (рис. 5.28, *ж*) и сопло открытого типа (рис. 5.28, *з*).

После выбора геометрических параметров червяка определяем производительность и расход механической мощности на пластикацию по методике, изложенной в разд. 5.4.3.

Прочностной расчет червяка включает определение напряжения сжатия в опасном сечении червяка от осевого усилия, равного

$$P_0 = \pi D_ч^2 p_{нл}/4 \qquad (5.57)$$

и напряжений изгиба от совместного действия изгибающей нагрузки (обусловленной силой тяжести горизонтально расположенного червяка и гидростатическим давлением в канале нарезки червяка) и крутящего момента на валу червяка. Вал червяка проверяется также на устойчивость по формуле типа (5.54). Если $\lambda_у > 80 \div 100$, то необходимо выполнить проверку на максимальный прогиб, который должен быть меньше радиального зазора между витками червяка и цилиндром.

Выбор конструктивных параметров пластикационного цилиндра, систем термостатирования, упорных подшипников аналогичен описанному в разд. 4.11 для экструзионного оборудования.

Расчет колонн и плит механизма пластикации проводится по методике, изложенной в разд. 3.3.1 для прессового оборудования.

5.6.4. Дозирующие и загрузочные устройства

Дозирующие устройства осуществляют подачу гранулированного или порошкообразного сырья в пространство перед плунжером через загрузочное отверстие в корпусе пластикационного цилиндра. В литьевом оборудовании в большинстве случаев применяются объемные дозирующие устройства как наиболее простые и надежные в работе. Одно из таких устройств входит в конструкцию узла пластикации и впрыска, показанную на рис. 5.17.

Сверху дозирующего устройства установлен бункер *10*. В исходном положении поршень-дозатор *12* открывает отверстие в бункере, и сырье просыпается в камеру дозирования — пространство перед поршнем *12*. При перемещении поршня *16* влево планка *14*, упираясь в гайку *13*, увлекает в поступательное движение поршень *12*. Сырьевой материал сталкивается по патрубку *Б* в загрузочное отверстие, перекрытое поршнем *9*. Материал попадает в материальный цилиндр *8* только после возвращения поршня *9* в исходное положение. Ход поршня-дозатора регулируется гайкой *13*.

Расчет основных размеров поршневых дозирующих устройств сводится к определению хода $l_з$ поршня *5* и диаметра $d_д$ (рис. 5.29). Объем дозы гранул или порошка в загрузочном устройстве $v_д$ может быть определен как

$$v_д = v_0 (\rho/\rho_г) \qquad (5.58)$$

где ρ и $\rho_г$ — плотность расплава и насыпная плотность гранул соответственно.

Параметры $l_з$ и $d_д$ выбираются, исходя из объема $v_г$, с учетом того, что угол естественного откоса для гранул равен 30°. Полагая, что $l_з \approx 3d_д$, находим формулу для подсчета $d_д$ в виде

$$d_д = \sqrt[3]{2v_г/\pi} \qquad (5.59)$$

Для объемного дозирования материала может применяться загрузочное устройство червячного типа, в котором проводится предварительное уплотнение рыхлого порошкообразного сырья и волокнитов (см. рис. 2.16). Бункер этого устройства может быть оснащен ворошителями, предотвращающими слеживание материала. Объем бункерного устройства $v_б$ ($м^3$) должен быть равен

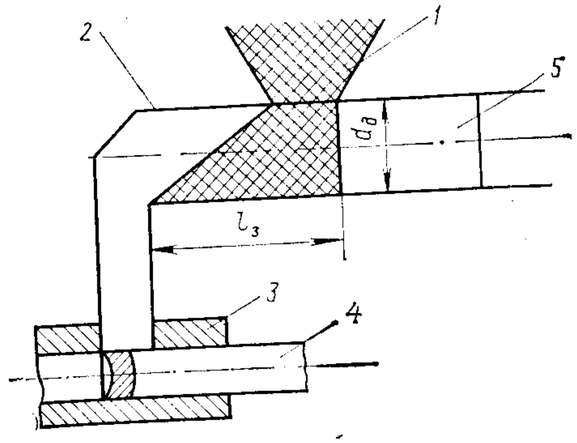


Рис. 5.29. Расчетная схема к определению размеров поршневого дозирующего устройства:
1 — бункер загрузочного устройства; *2* — корпус дозатора; *3* — материальный цилиндр механизма пластикации; *4* — поршень-пластикатор; *5* — поршень-дозатор.

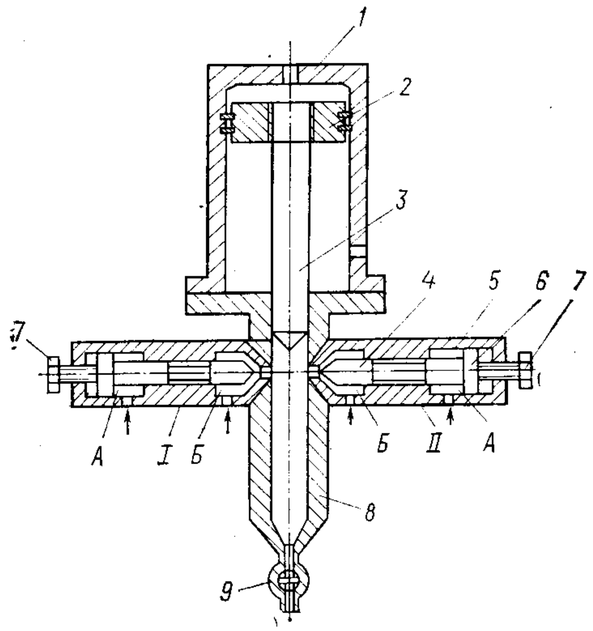


Рис. 5.30. Смеситель для олигомерных композиций:

1 — гидроцилиндр впрыска; *2* — поршень гидроцилиндра впрыска; *3* — шток поршня; *4* — игла; *5* — гидроцилиндр форсунки; *6* — поршень гидроцилиндра форсунки; *7* — регулировочные винты; *8* — смесительная камера; *9* — сопло.

объему гранулята или порошка, необходимого для обеспечения работы литьевой машины в течение одного часа:

$$v_б = \frac{v_0 \rho}{\rho_г} \cdot \frac{3600}{t_ц} \qquad (5.60)$$

где $t_ц$ — время цикла, с.

Угол между осью бункера и образующей конуса для гранул термопластов выбирается равным 30—40°, для пресс-порошков реактопластов — не более 30°.

Механизмы смешения и дозирования олигомерных композиций (рис. 5.30) агрегатов для литья вспененных материалов (см. разд. 5.5.3) представляют собой в ряде случаев комбинацию игольчатых форсунок и устройства впрыска. В камеру смешения *8* выходят сопла двух одинаковых по конструкции форсунок. Форсунка *I* предназначена для подачи олигомера с порообразователем, форсунка *II* служит для ввода отверждающего агента. Принцип действия обеих форсунок одинаков. При подаче рабочей жидкости (масла) в полость *А* гидроцилиндра *5* поршень *6* вместе с иглой *4* отходит вправо до регулировочного винта *7*. Находящийся в полости *Б* под давлением компонент продавливается через отверстие в смесительную камеру *8*. Пропорциональные объемные соотношения двух компонентов регулируются положением винтов *7*. Далее при подаче жидкости в рабочую полость гидроцилиндра впрыска *1* поршень *2* перемещает шток *3*, который сжимает смесь в камере *8* и впрыскивает ее в форму при открытии клапана сопла *9*.

5.7. МЕХАНИЗМЫ ЗАПИРАНИЯ ФОРМЫ

5.7.1. Конструктивные разновидности

Механизм запирания (смыкания) предназначен для закрывания и открывания литьевой формы, а также для удержания формы в сомкнутом состоянии при впрыске и формовании изделий. Для получения высококачественных изделий необходимо надежное смыкание формы, поскольку при неполном смыкании

может произойти выброс части материала по линии смыкания в облой при впрыске расплава.

Кинематика и конструктивные размеры прессовой части литьевой машины (механизма смыкания формы) не зависят от направления разъема плиты — вертикального или горизонтального, а определяются требуемой быстроходностью машины, технологическими параметрами процесса и геометрическими характеристиками изделия. Для увеличения быстроходности машины скорость смыкания и размыкания плит должна быть максимальной, причем с целью предотвращения повреждения плиты при закрывании формы скорость смыкания в конце хода должна снижаться.

На практике разработано и применяется большое число различных механизмов запирания, которые можно разделить на две группы: *простые* и *комбинированные*. В простых конструкциях механизмы перемещения плит и запирания формы совмещены, в комбинированных перемещение плиты осуществляется одним механизмом, а другой создает необходимое усилие смыкания формы (запирания).

По виду привода простые и комбинированные конструкции подразделяются на *гидравлические, пневматические, гидромеханические, пневмомеханические* и *механические*. Гидравлические и пневматические конструкции относятся к механизмам силового запирания, в которых усилие запирания является внешним по отношению к самому механизму. Гидромеханические, пневмомеханические и механические устройства являются механизмами кинематического запирания. В механизмах этого типа усилие запирания развивается за счет упругой деформации звеньев, создаваемой приводом. После прекращения действия силы, развиваемой ведущим звеном механизма, необходимое усилие запирания сохраняется в виде внутренней силы, являющейся результатом упругой деформации.

В современных конструкциях литьевого оборудования прессовые части пневматического, пневмомеханического и механического типов не нашли широкого применения из-за незначительности развиваемых ими усилий запирания. В литьевых машинах с малым объемом впрыска применение механических узлов запирания может быть оправдано ввиду их высокой быстроходности и малой энергоемкости.

Наиболее широкое распространение получили гидравлические и гидромеханические конструкции.

5.7.2. Конструкция и расчет гидравлических механизмов

Гидравлические механизмы осуществляют подвод плиты и запирание формы с помощью одного или нескольких гидроцилиндров без введения промежуточных механизмов, что повышает надежность конструкции. Гидравлические механизмы позволяют легко регулировать расстояние между плитами, надежно пред-

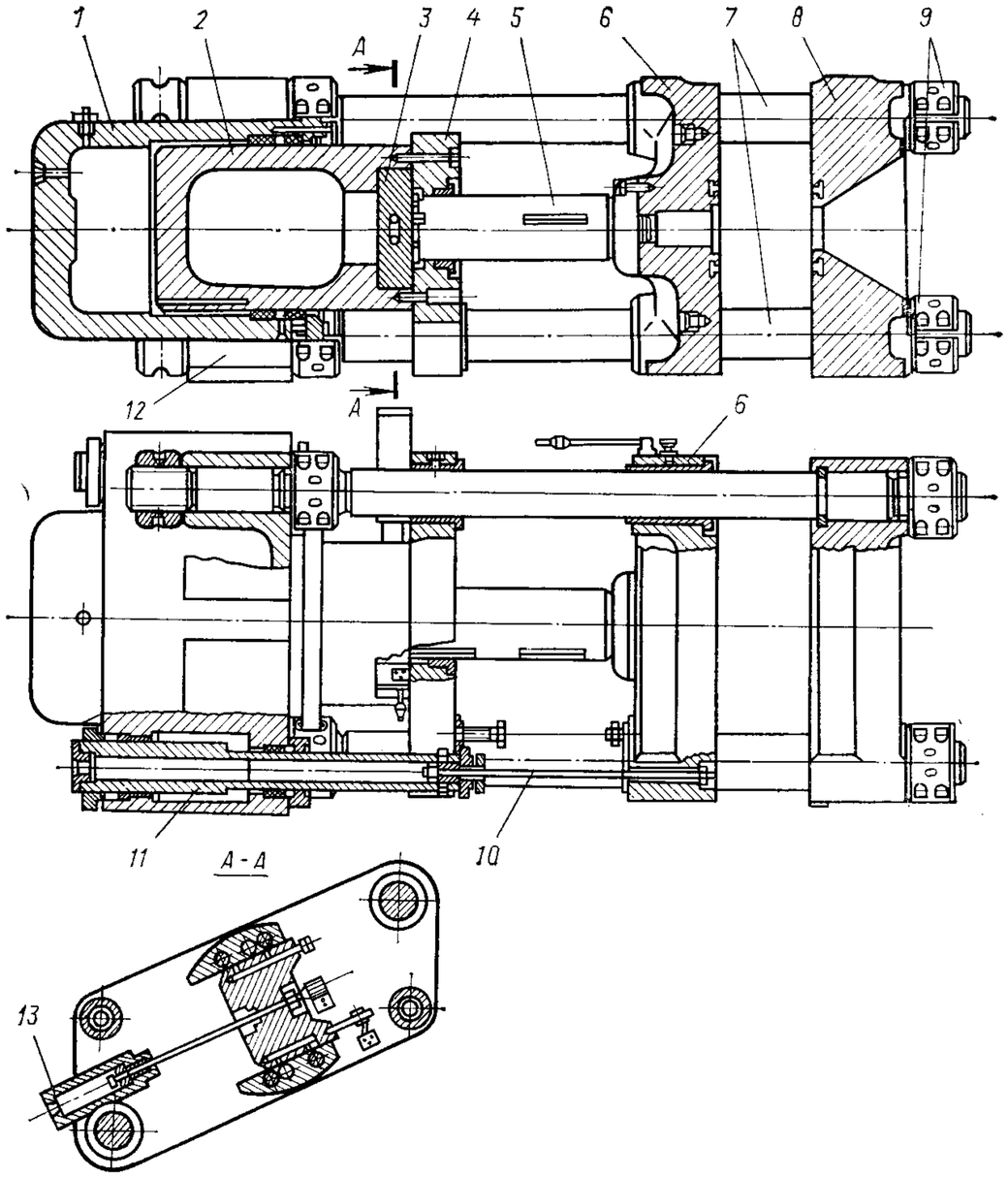


Рис. 5.31. Комбинированный гидравлический механизм запирания формы:
1 — гидроцилиндр; *2* — плунжер; *3* — защелка; *4* — промежуточная плита; *5* — вспомогательный плунжер; *6* — подвижная плита; *7* — колонна; *8, 12* — неподвижные плиты; *9* — гайка; *10* — шток; *11* — вспомогательный гидроцилиндр; *13* — гидроцилиндр перемещения защелки.

охранены от поломок и перегрузок. К недостаткам гидравлических узлов запирания относится их значительная металлоемкость и малая скорость смыкания формы по сравнению с гидромеханическими конструкциями.

Прессовая часть литьевой машины (механизм запирания формы) современной комбинированной гидравлической конструкции представлена на рис. 5.31. В этом механизме неподвижная плита *12* выполнена заодно с гидроцилиндром *1* и жестко связана колоннами *7* с гайками *9* с другой неподвижной плитой *8*. Полый плунжер *2* прикреплен к промежуточной плите *4*

защелкой *3*. Ускоренное смыкание подвижной плиты *6* с неподвижной плитой *8* осуществляется двумя вспомогательными гидроцилиндрами *11* со штоками *10*. При этом происходит вывод вспомогательного плунжера *5* из полости плунжера *2*. После этого защелка *3* с помощью гидроцилиндра *13* закрывает промежуток между вспомогательным плунжером *5* и плунжером *2*. Усилие запирания (смыкания) формы, создаваемое затем гидроцилиндром *1* при подаче туда жидкости, от плунжера *2* через защелку *3* и вспомогательный плунжер *5* передается подвижной плите *6*. Для повышения давления рабочей жидкости, поступающей от насоса, в гидросистеме прессовой части устанавливается мультипликатор. Данная конструкция применяется в литьевых машинах большой мощности с усилием запирания до 3,5 МН.

Расчет гидравлического механизма запирания сводится к определению диаметров и хода поршней главного и вспомогательного цилиндров, а также производительности насоса гидропривода.

Диаметр $D_п$ поршня главного гидроцилиндра определяется по уравнению

$$D_п = \sqrt{4P_з/(\pi p_г)} \qquad (5.61)$$

где $P_з$ — усилие запирания (смыкания), определенное по формуле (5.33); $p_г$ — давление жидкости в гидросистеме запирания, выбираемое в пределах от 5 до 20 МПа.

Производительность $Q_н$ гидронасоса привода механизма смыкания определяется из соотношения

$$Q_н = V_{зф}\pi D_п^2/4 \qquad (5.62)$$

где $V_{зф}$ — принятая скорость смыкания формы (для ускоренного перемещения $V_{зфу}=0{,}3\div0{,}35$ м/с, для замедленного перемещения $V_{зфм}=0{,}04\div0{,}05$ м/с).

Диаметр плунжера $d_у$ ускоренного перемещения подвижной плиты определяется из условия обеспечения принятой скорости $V_{зфу}$ при определенной производительности насоса:

$$d_у = \sqrt{4Q_н/(\pi V_{зфу})} \qquad (5.63)$$

В механизмах запирания гидравлического типа расчету на прочность подлежат гидроцилиндры, колонны и плиты. Методика расчета аналогична методике прочностных расчетов элементов конструкции прессового оборудования.

5.7.3. Конструкция и расчет гидромеханических механизмов

В механизмах запирания *простой гидромеханической конструкции* усилие запирания формы и движение подвижной плите сообщаются от гидроцилиндра через рычажную систему. Гидромеханические конструкции позволяют получить значительные усилия запирания плит при небольших усилиях, развиваемых гидроцилиндром привода. Это дает возможность использовать

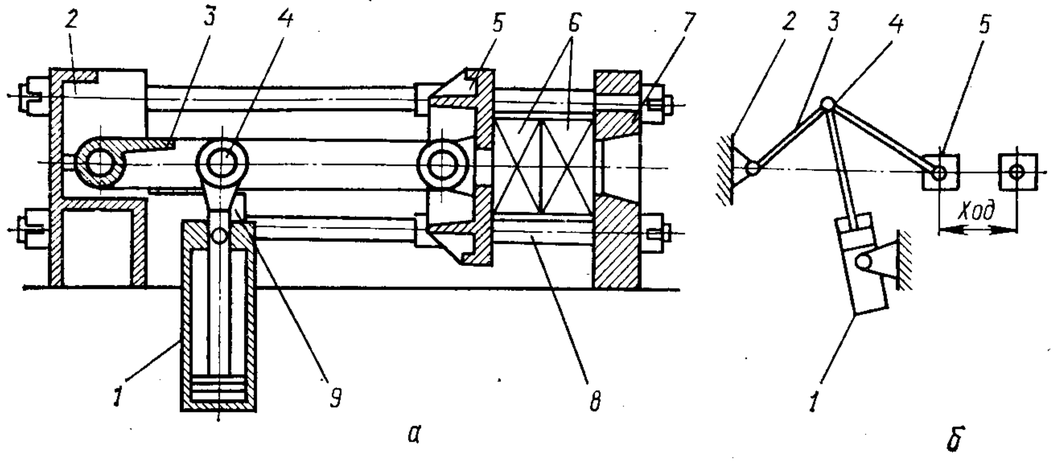


Рис. 5.32. Конструктивная (*а*) и кинематическая (*б*) схемы шестизвенного механизма запирания формы с качающимся гидроцилиндром:
1 — гидроцилиндр; *2, 7* — неподвижные плиты; *3* — система рычагов; *4* — шарнир; *5* — подвижная плита; *6* — полуформы; *8* — колонна; *9* — каретка.

в гидросистемах давления, значительно меньшие, чем в гидравлических механизмах запирания.

Главными преимуществами гидромеханических устройств являются: небольшие габариты и масса, малая металлоемкость; высокая средняя скорость запирания; безударное запирание ввиду возможности замедления скорости сближения форм перед их смыканием.

Кинематические схемы гидромеханических устройств запирания довольно разнообразны. На рис. 5.32 представлены конструктивная и кинематическая схемы простого шестизвенного гидромеханического механизма с качающимся гидроцилиндром *1*, применяемого в литьевых машинах с усилием запирания до 1 МН.

Гидроцилиндр *1* через систему рычагов *3* и шарниров *4* перемещает подвижную плиту *5*. Гидроцилиндр *1* шарнирно закреплен на каретке *9*, которая вместе с системой рычагов может перемещаться по колоннам *8* при регулировании расстояния между плитами *5* и *7*. Неподвижные плиты *2* и *7* жестко связаны колоннами *8*. Смыкание полуформ *6* осуществляется при подаче жидкости в штоковую полость гидроцилиндра.

В механизмах запирания простой гидромеханической конструкции для создания значительного усилия запирания требуются гидроцилиндры большого диаметра. Скорость перемещения плиты при этом уменьшается, что требует увеличения производительности гидронасосов. Поэтому получили распространение *комбинированные гидромеханические конструкции,* в которых перемещение подвижной плиты и создание усилия запирания осуществляются различными гидроцилиндрами. Одна из таких конструкций показана на рис. 5.33.

Ускоренное смыкание полуформ *7*, укрепленных на подвижной *6* и неподвижной *8* плитах, достигается при подаче жидко-

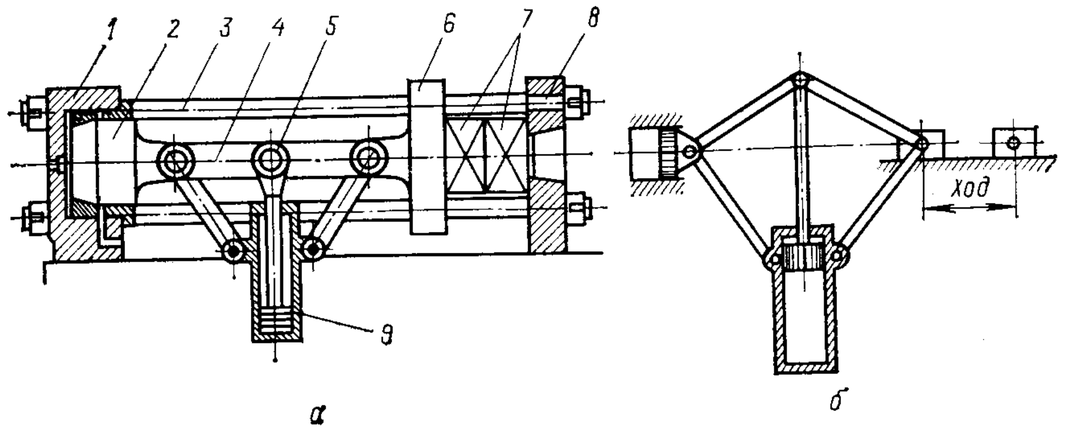


Рис. 5.33. Конструктивная (*а*) и кинематическая (*б*) схемы механизма запирания формы гидромеханического типа с подвесным гидроцилиндром:
1, 9 — гидроцилиндры; *2* — поршень; *3* — колонна; *4* — система рычагов; *5* — шарнир; *6* — подвижная плита; *7* — полуформы; *8* — неподвижная плита.

сти в штоковую полость гидроцилиндра *9*. После распрямления рычажной системы, состоящей из рычагов *4* и шарниров *5*, через нее передается усилие запирания, создаваемое гидроцилиндром *1* с поршнем *2* большого диаметра, совершающим небольшой ход. После снятия высокого давления в гидроцилиндре *1* при подаче жидкости в полость перед поршнем гидроцилиндра *9* производят размыкание полуформ. Гидроцилиндр *1*, выполненный заодно с неподвижной плитой, жестко связан колоннами *3* с плитой *8*. Такая система увеличивает быстроходность машины, уменьшает производительность насосов и затрачиваемую мощность гидропривода. Расстояние между плитами в этой конструкции регулируется изменением длины одного из рычагов.

Методика кинематического и силового расчета гидромеханических механизмов излагается на примере механизма запирания, показанного на рис. 5.34. Плита *1* перемещается при помо-

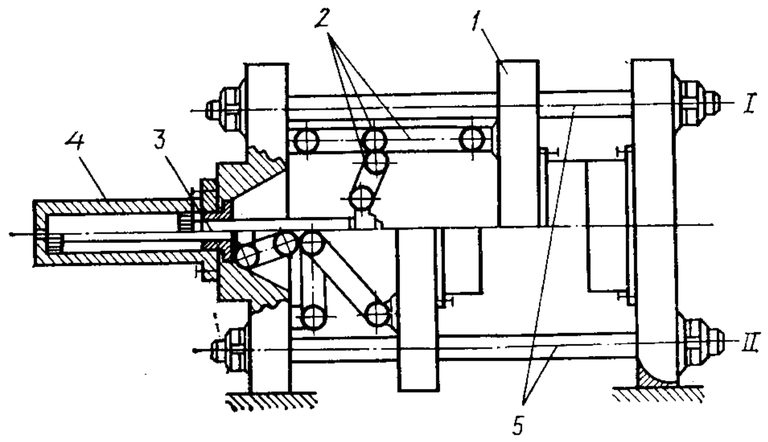


Рис. 5.34. Механизм запирания формы с горизонтальным гидроцилиндром:
I (выше оси) — сомкнутое состояние формы; *II* — (ниже оси) разомкнутое состояние формы; *1* — подвижная плита; *2* — рычажное устройство; *3* — шток поршня; *4* — гидроцилиндр; *5* — колонны.

щи малогабаритного гидроцилиндра *4* и передаточного сдвоенного рычажного устройства *2*. Рычажная система приводится в движение штоком *3* поршня гидроцилиндра *4*. При перемещении штока *3* вправо рычаги разворачиваются, как показано на верхней части рисунка (поз. *I*), а при перемещении влево — складываются (поз. *II*). Данная конструкция применяется в машинах малой и средней мощности с усилием запирания до 1,3 МН.

Задачей конструирования узла кинематического запирания является выбор оптимальных размеров звеньев, обеспечивающих наименьшие габариты механизма и минимальные усилия в элементах конструкции в процессе работы. Исходными данными для конструирования служат параметры: усилие запирания (смыкания) $P_з$, ход подвижной плиты $L_п$, наибольшее расстояние между плитами $L_{пп}$, а также габариты подвижной плиты. Расчету подлежат основные размеры элементов рычажной системы: высота формы, ход и диаметр поршня гидроцилиндра, максимальные усилия, возникающие в силовой цепи замыкающего устройства.

Расчет начинается с составления упрощенной расчетной схемы механизма, показанной на рис. 5.35. Шарнир B на данной схеме, в котором сочленяются коромысло BD, шатун BC и серьга AB, для большей подвижности выполнен в виде двух шарниров (см. рис. 5.34). Однако расстояние между осями этих шарниров мало́ по сравнению с продольными размерами рычагов, поэтому при анализе механизма Г-образный шатун с двумя шарнирами можно заменить линейным с одним шарниром.

Полный расчет механизма запирания состоит из следующих этапов: а) аналитическое определение траекторий движения

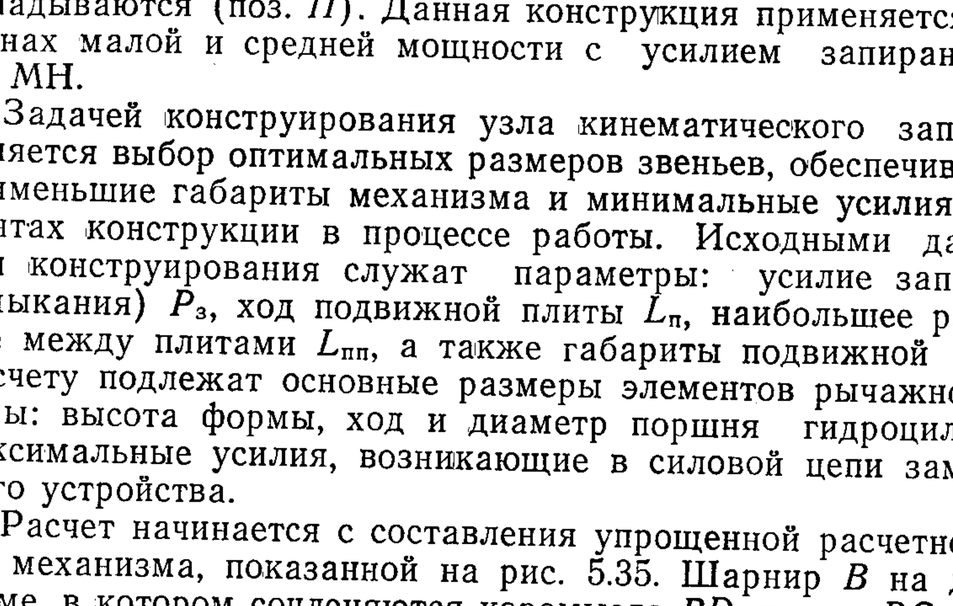


Рис. 5.35. Расчетная схема механизма запирания в разомкнутом положении (*I*) и в момент смыкания (*II*). Пояснения в тексте.

всех узловых точек механизма в параметрической форме; б) определение продольных размеров звеньев и полного хода штока на основе проведенного в пункте «а» кинематического анализа и заданных исходных геометрических параметров; в) определение жесткости при растяжении — сжатии полной силовой цепи, включающей полуформы, плиты, направляющие колонны и систему коромысло — шатун, при заданном усилии смыкания; г) определение аналитическим путем зависимости усилий в звеньях от какого-либо из параметров положения механизма (в данном расчете — от угла поворота коромысла α_1, изменяющегося от α_1' до α_1''); д) определение максимальных усилий в звеньях аналитическим или графическим способом; е) расчет на прочность звеньев механизма по определенным максимальным усилиям.

Для определения усилий, развиваемых в системе механизма запирания, требуется рассмотрение статически неопределимой системы и применение условия совместности деформаций. При этом следует иметь в виду, что максимальные усилия в звеньях возникают только при входе в контакт полуформ Φ_1 и Φ_2. В этом положении рычаги механизма DB и BC параллельны горизонтальной оси машины, колонны растянуты. В момент запирания формы усилие с ведущего звена (штока) снимается. Соприкосновение плит формы происходит до того, как рычажный механизм займет свое крайнее положение. Механизм рассчитывается в положении, когда литьевая форма начинает закрываться и оси рычагов DB и BC расположены под углом 3—5° к оси машины (поз. *II* на рис. 5.35). Начиная с этого момента звенья механизма и колонны начинают испытывать деформации. Усилие $P_з$ и упругие деформации достигают максимальных значений одновременно при крайнем положении подвижной плиты.

Приступая к кинематическому анализу работы рычажного механизма, запишем траектории движения всех узловых точек (шарниров) в зависимости от принятого аргумента — угла поворота α_1. В принятой на рис. 5.35 системе координат координаты точки B записываются следующим образом:

$$x_B = l_к \cos\alpha_1; \qquad y_B = l_к \sin\alpha_1 \tag{5.64}$$

где $l_к$ — длина коромысла BD.

Для точки A $y_A = a = \text{const}$, где a — параметр механизма, определяемый конструктивно (см. рис. 5.35).

Координата x_A находится из соотношения

$$x_A = l_к \cos\alpha_1 \pm \sqrt{l_с^2 - (l_к \sin\alpha_1 - a)^2} \tag{5.65}$$

Здесь $l_с$ — длина серьги AB, равная

$$l_с = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \tag{5.66}$$

Для точки E аналогичным образом определяем

$$y_E = m = \text{const}; \qquad x_E = x_A \tag{5.67}$$

где m — конструктивный параметр.

Для точки C

$$x_C = DO + OC = l_к \cos\alpha_1 + l_ш \cos\alpha_2 \tag{5.68}$$

где $l_ш$ — длина шатуна BC.

Выражение для $\cos\alpha_2$ можно записать как

$$\cos\alpha_2 = OC/l_ш = \sqrt{l_ш^2 - OB^2}/l_ш = \sqrt{l_ш^2 - (l_к \sin\alpha_1)^2}/l_ш =$$
$$= (l_к/l_ш)\sqrt{(l_ш/l_к)^2 - \sin^2\alpha_1} \tag{5.69}$$

Далее, с учетом (5.69) для точки C имеем

$$y_C = 0; \qquad x_C = l_к[\cos\alpha_1 + \sqrt{(l_ш/l_к)^2 - \sin^2\alpha_1}] \tag{5.70}$$

Угол α_2'' ($\alpha_2' < \alpha_2 < \alpha_2''$) при $\alpha_1'' = 90°$ выбирается равным не более 60°, так как при $\alpha_2'' = 60°$ в шатуне BC возникают значительные усилия, бóльшие максимального значения $P_з$. Следовательно

$$l_к/l_ш = \sin 60° \tag{5.71}$$

Полный ход подвижной плиты $L_п$, заданный при расчете, равен разности абсцисс точки C в сомкнутом положении при $\alpha_1 = 0°$ и в крайнем разомкнутом положении при $\alpha_1 = \alpha_1'' = 90°$:

$$L_п = x_C\big|_{\alpha_1=0} - x_C\big|_{\alpha_1=90°} \tag{5.72}$$

Отсюда, воспользовавшись (5.70), получаем

$$L_п = l_к[1 - l_ш/l_к - \sqrt{(l_ш/l_к)^2 - 1}] \tag{5.73}$$

Длины рычагов $l_ш$ и $l_к$ определяются совместным решением (5.71) и (5.73).

Полный ход штока $s_ш$ (ход поршня гидроцилиндра) равен

$$s_ш = x_E\big|_{\alpha_1=0} - x_E\big|_{\alpha_1=90°} \tag{5.74}$$

или при учете (5.61) и (5.67)

$$s_ш = l_к + \sqrt{l_с^2 - a^2} + \sqrt{l_с^2 - (l_к - a)^2} \tag{5.75}$$

Таким образом определяются длины всех звеньев механизма смыкания.

Переходим далее к силовому расчету. Прежде всего необходимо определить зависимость усилия запирания $P_з$ от выбранного заранее параметра α_1 путем рассмотрения условия минимального раскрытия стыка пресс-формы. Это условие в соответствии с законом Гука может быть записано в виде

$$\delta = \frac{P_з}{2}\,\frac{1}{E}\sum\frac{l_i}{F_i} \tag{5.76}$$

где δ — полная деформация всех элементов силовой цепи; E — модуль упругости; l_i, F_i — длины и поперечные сечения элементов соответственно.

Очевидно, что при $\alpha = \alpha_1'$, в момент соприкосновения полуформ, $P_з = 0$; $P_з = P_{з\,макс}$ при распрямлении рычагов, т. е. при $\alpha_1 \approx 0$ ($P_{з\,макс}$ — максимальное значение $P_з$).

Считая, что в силовой цепи деформируемыми элементами являются колонны 5 (см. рис. 5.34) (деформация растяжения) и система коромысло — шатун (деформация сжатия), можно записать:

$$\sum(l_i/F_i) = l_1/F_1 + l_2/F_2 \tag{5.77}$$

где $l_1 = l_к + l_ш$ (так как α_1 и α_2 на этапе смыкания очень малы, считаем, что шатун и коромысло вытянуты в прямую линию); F_1 — поперечное сечение шатуна, равное поперечному сечению коромысла; l_2 — длина рабочей части колонны, равная $l_2 = l_ш + l_к + h_{пл} + H_ф + h_с$ (здесь $h_{пл}$ — высота плит, $h_с$ — высота стойки шарниров D и C, $H_ф$ — высота формы); F_2 — поперечное сечение колонны, определяемое из прочностного расчета по формуле (3.20).

Деформация плит и полуформ при этом не учитывается, так как их жесткость значительно выше, чем жесткость прочих элементов силовой цепи.

С другой стороны, для величины δ можно записать

$$\delta = x_C\big|_{\alpha=\alpha_1} - x_C\big|_{\alpha=\alpha_1'} \tag{5.78}$$

Решая совместно уравнения (5.76), (5.77), (5.78) и (5.70), получаем:

$$P_з = \frac{2El_к}{l_1/F_1 + l_2/F_2}\{(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_1') + [\sqrt{(l_ш/l_к)^2 - \sin^2\alpha_1} -$$
$$- \sqrt{(l_ш/l_к)^2 - \sin^2\alpha_1'}]\} \tag{5.79}$$

Величина усилия в стержне BC составляет

$$P_{BC} = P_з/(2\cos\alpha_2)$$

или с учетом (5.69)

$$P_{BC} = \frac{P_з l_ш}{2l_к\sqrt{(l_ш/l_к)^2 - \sin^2\alpha_1}} \tag{5.80}$$

Из выражения (5.80) следует, что P_{BC} имеет максимальное значение при $\alpha_1 = 0$, равное $P_{з\,макс}/2$, т. е.

$$P_{BC}\big|_{\alpha_1=0} = P_{з\,макс}/2 \tag{5.81}$$

Подставив (5.81) в (5.80) и определив по условию

$$P_{з\,макс}/2 = F_1[\sigma_{сж}] \tag{5.82}$$

площадь F_1, находим угол α_1', соответствующий началу запирания формы.

Таким образом, выражение (5.79) является искомой зависимостью усилия запирания $P_з$ от параметра положения механизма α_1 при определенных α_1', F_1, F_2, l_1 и l_2.

Подход к анализу изменения усилия в серьге P_{AB}, на штоке гидроцилиндра привода $P_ш$ и в коромысле P_{BD} такой же, как

и в случае отыскания зависимостей $P_з=f(\alpha_1)$ и $P_{BC}=f(\alpha_1)$. Не приводя промежуточных выкладок, даем окончательные формулы:

$$P_{AB}=\frac{P_{BC}(\alpha_1)\,l_ш\left[\cos\alpha_1+\sqrt{\left(\frac{l_ш}{l_к}\right)^2-\sin^2\alpha_1}\right][l_c^2-2(l_к\sin\alpha_1-a)^2]}{l_к l_c\sin^2\alpha_1\,[l_к\cos\alpha_1+\sqrt{l_c^2+(l_к\sin\alpha_1-a)^2}-a\cos\alpha_1]} \tag{5.83}$$

$$P_ш=\frac{2EF_1F_2}{l_1F_2+l_2F_1}\,\frac{l_к}{\sin\alpha_1}\sqrt{\left(\frac{l_ш}{l_к}\right)^2-\sin^2\alpha_1}\left[(\cos\alpha_1-\cos\alpha_1')+\right.$$
$$+\left(\sqrt{\left(\frac{l_ш}{l_к}\right)^2-\sin^2\alpha_1}-\sqrt{\left(\frac{l_ш}{l_к}\right)^2-\sin^2\alpha_1'}\right)\Big]\Big[\cos\alpha_1+$$
$$\left.+\sqrt{\left(\frac{l_ш}{l_к}\right)^2-\sin^2\alpha_1}\right][l_c^2+2(l_к\sin\alpha_1-a)^2]\times$$
$$\times\frac{\sqrt{l_c^2-(l_к^2\sin\alpha_1-a)^2}}{l_c^2\,[\cos\alpha_1\,(l_к\sin\alpha_1-a)+\sin\alpha_1\sqrt{l_c^2-(l_к\sin\alpha_1-a)^2}]} \tag{5.84}$$

$$P_{BD}=P_{BC}\cos\alpha_1 \tag{5.85}$$

Поиск максимальных значений функций $P_{AB}(\alpha_1)$ и $P_ш(\alpha_1)$ целесообразно проводить на ЭВМ с использованием итерационной процедуры.

После определения максимальных значений P_{AB}, $P_ш$ и P_{BD} производится прочностной расчет серьги, штока гидроцилиндра и коромысла и определение диаметра поршня гидроцилиндра по формуле (5.61) при принятом давлении жидкости в гидроприводе. Затем, при известных диаметре поршня гидроцилиндра, ходе штока и времени смыкания рассчитывается производительность гидропривода по формуле (5.62). С целью уменьшения износа формующего инструмента и получения изделий с высокой размерной точностью к конструкции прессовой части предъявляются особые требования по нормам точности. Это относится к плоскостности и параллельности рабочих поверхностей подвижной и неподвижной плит, перпендикулярности хода подвижной плиты к плоскости неподвижной плиты, соосности механизмов запирания и пластикации — впрыска. Допускаемые погрешности и методы измерения этих показателей определены ГОСТ 10319—74. Прочностной расчет плит механизма смыкания форм, гаек колонн, выбор типов уплотнения аналогичны представленным для прессового оборудования в разд. 3.3.

Рычаги механизма изготавливают литыми (из стали марки 45) или коваными (из сталей 45, 40Х) с поперечным сечением прямоугольной формы с соотношением сторон, равным 3 : 4. Рычаги работают на сжатие по допускаемым напряжениям для литых рычагов $[\sigma_{сж}]=80\div90$ МПа и для кованых $[\sigma_{сж}]=110\div140$ МПа. После определения площади поперечного сечения рычаги проверяются на устойчивость. Втулки рычагов

ЭКСПОРТ

изготавливаются из стали ШХ-15 с последующей закалкой и проверяются по допускаемому удельному давлению смятия поверхности: $[p_{см}]=100\div120$ МПа.

Оси рычагов изготавливают из стали 40ХН и проверяют по допускаемым напряжениям.

5.7.4. Расчет позиционности и темпа работы многопозиционных механизмов запирания формы

Многопозиционные литьевые машины отличаются тем, что имеют несколько позиций впрыска и смыкания форм. Эти высокопроизводительные литьевые машины делятся на револьверные, револьверно-роторные и роторные. *Револьверные* машины имеют одну позицию впрыска, обслуживающую несколько позиций смыкания форм, расположенных на столе, вращающемся вокруг вертикальной или горизонтальной оси. *Роторные* машины имеют одинаковое число позиций впрыска и смыкания форм. В *револьверно-роторных* машинах число позиций впрыска не равно числу позиций смыкания.

Горизонтальная револьверная машина (рис. 5.36) имеет один механизм впрыска, состоящий из нагревательного цилиндра *12* с червяком *13*. Приводом осевого перемещения червяка служит поршень *17* гидроцилиндра *18*, а вращение червяка осуществляется через редуктор *16*. Вокруг оси *7* поворачивается револьверная головка *4* с помощью храпового механизма *3*. Полуформы *6* крепятся к штокам *22* двух гидроцилиндров двойного дейст-

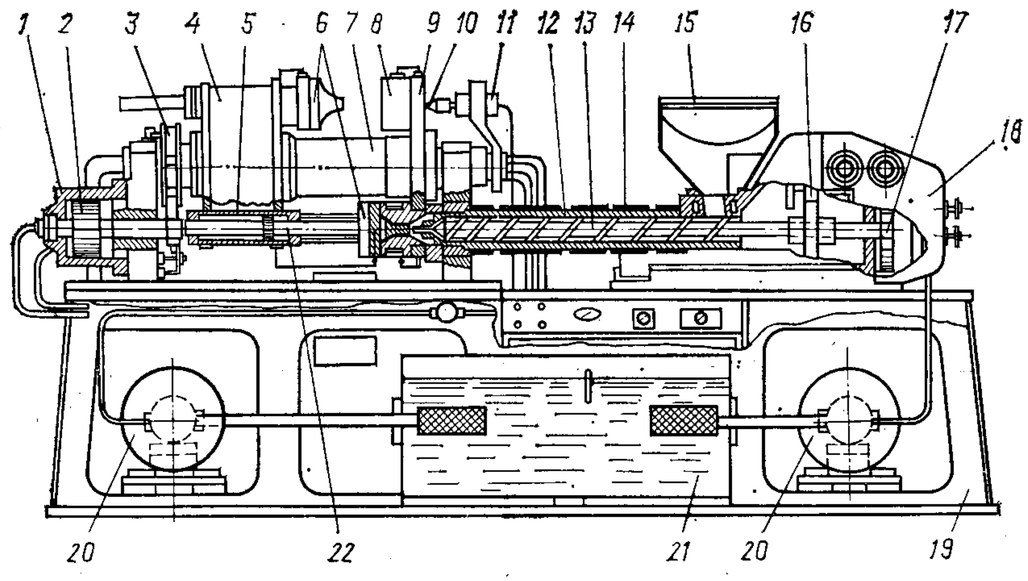


Рис. 5.36. Многопозиционная горизонтальная револьверная литьевая машина: *1* — гидроцилиндр смыкания полуформ; *2* — поршень; *3* — храповой механизм; *4* — револьверная головка; *5* — гидроцилиндр двойного действия; *6*, *8* — полуформы; *7* — ось револьверной головки; *9* — диск для крепления полуформ; *10* — игла; *11* — гидроцилиндр привода иглы; *12* — нагревательный цилиндр; *13* — червяк; *14* — нагреватели; *15* — бункер; *16* — редуктор; *17* — поршень; *18* — гидроцилиндр осевого перемещения червяка; *19* — станина; *20* — насосы; *21* — гидробак; *22* — шток.

вия *5*. Диск *9* предназначен для крепления полуформ *8*. Поршень *2* гидроцилиндра *1* служит для окончательного смыкания полуформ *8* позиции впрыска. Гидропривод состоит из насосов *20* и гидробака *21*. Материал поступает из бункера *15* и расплавляется нагревателями *14*. Литники удаляются иглой *10*, имеющей привод от гидроцилиндра *11*. Если машина имеет две позиции работы механизма смыкания, то в одной позиции производится впрыск материала и выдержка, а в другой в это время — раскрытие формы и извлечение готового изделия.

В револьверной машине вращение стола — прерывистое (дискретное), в роторной и револьверно-роторной стол перемещается непрерывно. Механизмы пластикации — впрыска многопозиционных литьевых машин работают так же, как и в однопозиционном оборудовании. Механизмы запирания форм бывают в основном гидравлической и (реже) гидромеханической конструкции.

Механизмы запирания форм характеризуются числом позиций K. Темп работы машины определяется наименьшим временем впрыска $t_{вп}$, временем выдержки под давлением $t_{впд}$, временем поворота ротора на одну позицию $t_{поз}$ и временем пауз $t_{пз}$ — параметрами, зависящими от технологии процесса и от конструктивных особенностей оборудования.

Время цикла при работе револьверной машины равно

$$t'_{ц} = t_{вп} + t_{впд} + t_{пз} + t_{поз} \qquad (5.86)$$

Для роторной и револьверно-роторной машин

$$t''_{ц} = t_{ц}/K \qquad (5.87)$$

где $t_{ц}$ — время цикла изготовления изделия в одной позиции [см. формулу (5.7)].

Для расчета составляющей $t_{б}$ предлагаются следующие соотношения:
для револьверной машины

$$t'_{поз} = t_{охл\ б/д} \frac{1}{K - K_1 - 1} + (t_{вп} + t_{впд} + t_{пз}) \frac{K - K_1 - 2}{K - K_1 - 1} \qquad (5.88)$$

для роторной и револьверно-роторной машин

$$t''_{поз} = t_{т}/(K - K_1) \qquad (5.89)$$

где K_1 — число позиций между позицией размыкания и позицией впрыска; $t_{охл\ б/д}$ — время охлаждения без давления; $t_{пз} = 1$ с; $t_{т}$ — технологическое время ($t_{т} = t_{впд} + t_{охл\ б/д}$).

Время пластикации определяется по следующей формуле:
для револьверной машины

$$t'_{пл} = t'_{б} + t'_{пз} \qquad (5.90)$$

для роторной и револьверно-роторной машин

$$t''_{пл} = (t_{ц}/2\pi)(2\pi - \alpha_{п} - \alpha_{б}) \qquad (5.91)$$

где $\alpha_{п}$ и $\alpha_{б}$ — углы поворота ротора, на которых производятся выдержка под давлением и вспомогательные операции соответственно.

Необходимое число позиций K для револьверной машины составляет

$$K = K_1 \frac{2t_{вп} + 2t_{впд} + t_{охл\ б/д} + 2t_{т} + 2t'_{пл}}{t_{вп} + t_{впд} + t_{пз} + t_{пл}} \qquad (5.92)$$

5.8. ГИДРОСХЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ЛИТЬЕВОЙ МАШИНЫ

Работа гидропривода литьевой машины вместе с электроприводом и электрокомандными механизмами (пускателями, переключателями, реле и т. д.) обеспечивает заданную последовательность выполнения технологических операций через определенные интервалы времени в автоматическом, полуавтоматическом и наладочном режимах. Литьевые машины в большинстве конструкций являются саморегулирующимися, т. е. выполняющими регулирование в автоматическом режиме основных технологических параметров. Эти параметры описаны ранее в разд. 5.3.1—5.3.3. Саморегулирующаяся литьевая машина оснащается счетно-часовым механизмом для отсчета составляющих времени цикла, гидро- и термодатчиками, датчиками перемещения червяка, автоматическими контрольными весами для взвешивания изделий, приборами для регистрации и регулирования давления рабочей жидкости гидросистемы и температуры нагрева материала. Принцип регулирования температуры описан в разд. 4.12. Все органы управления сосредоточены на пульте, который устанавливается на лицевой части машины. Электрошкаф с аппаратурой электрической схемы в большинстве случаев монтируется отдельно.

Принципиальная схема управления литьевой машиной объемом впрыска до 63 см³/цикл, составленная с использованием условных обозначений по ГОСТ 2.780—68 и ГОСТ 2.782—68, представлена на рис. 5.37.

Насосы *31* и *33* приводятся в действие от электродвигателя *35*. При включении электромагнитов 1Э и 2Э реверсивный золотник *29* перемещается влево и пропускает масло, движущееся от насоса *31* по магистрали *26* в магистраль *25*, блокировочный золотник *17* и штоковую полость гидроцилиндра запирания *15*. При этом поршень *16* перемещается вниз, рычаги *2* передвигают плиту *3* по колоннам *4* к неподвижной плите *5*, и форма смыкается, а масло из рабочей полости гидроцилиндра вытесняется по магистрали *24* в бак. Конечный выключатель 1КВ после смыкания формы включает электромагниты 3Э и 4Э, которые сдвигают золотники *30* и *34* соответственно вправо и влево. Поток масла от насоса *33* проходит через золотник *34*, магистраль *23*, обратный клапан *14*, соединяется с потоком масла от насоса *31*, поступающим через магистраль *26*, золотник *30*, магистраль *21*, и заполняет полость гидроцилиндра впрыска *11*. Поршень *12* перемещает червяк в цилиндре *7*, в конце хода которого срабатывает конечный выключатель 2КВ.

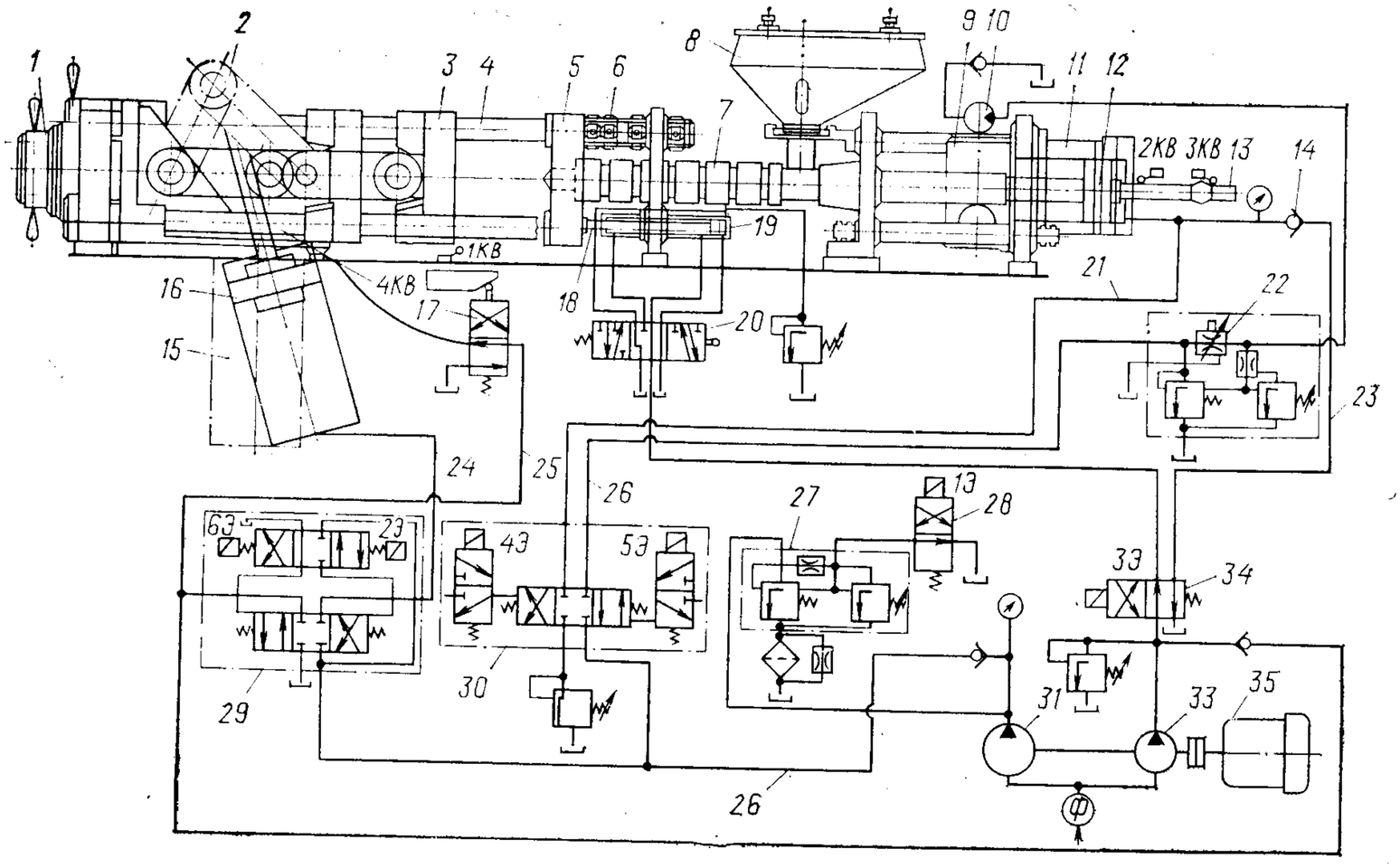


Рис. 5.37. Схема управления работой литьевой машины:

1, 6 — регулировочные гайки; *2* — рычаг; *3* — подвижная плита; *4* — колонна; *5* — неподвижная плита; *7* — нагревательный цилиндр механизма пластикации; *8* — бункер; *9* — редуктор; *10* — гидромотор; *11* — гидроцилиндр впрыска; *12* — поршень гидроцилиндра впрыска; *13* — шток конечного выключателя; *14* — обратный клапан; *15* — гидроцилиндр механизма запирания формы; *16* — поршень; *17* — золотник блокировки; *18* — шток; *19* — вспомогательный гидроцилиндр; *20* — золотник управления; *21, 23—26* — магистрали (трубопроводы); *22* — дроссель; *27* — клапан; *28, 34* — золотники двухпозиционные; *29* — реверсивный золотник; *30* — золотник трехпозиционный; *31, 33* — насосы; *32* — золотник напорный; *35* — электродвигатель; 1Э, 2Э, 3Э, 4Э, 5Э — электромагниты управления; 1КВ, 2КВ, 3КВ, 4КВ — конечные выключатели.

Электромагниты 1Э, 2Э, 4Э отключаются и следует выдержка под давлением по реле времени. На этой стадии золотник *28* осуществляет слив масла из насоса *31* в бак, а давление в гидросхеме впрыска поддерживается напорным золотником *32*. После выключения электромагнита 3Э включают электромагниты 5Э и 1Э, следует выдержка без давления, золотник *28* прекращает слив масла из насоса *31*, и оно по магистрали *26* поступает в гидромотор *10*. Частота вращения червяка регулируется дросселем *22*. Масло из гидроцилиндра *11* вытесняется по трубопроводу *21* на слив.

По окончании набора дозы конечный выключатель 3КВ отключает электромагниты 5Э и 1Э, и насос *31* снова работает на слив через клапан *27* и золотник *28*. По окончании времени выдержки на охлаждение включаются электромагниты 5Э и 1Э, и масло по трубопроводам *26* и *24* поступает в рабочую полость гидроцилиндра *15*, форма раскрывается. В конце размыкания формы конечный выключатель 4КВ отключает электромагниты 1Э и 6Э, и включается реле времени паузы.

Вспомогательный гидроцилиндр *19* со штоком *18*, управляемый золотником *20*, служит для перемещения плиты *5* в наладочном режиме. Гайки *6* и *1* регулируют положение плит *5* и *3*.

5.9. УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ БЕЗОПАСНУЮ РАБОТУ НА ЛИТЬЕВЫХ МАШИНАХ

Для защиты обслуживающего персонала от травм и предотвращения выхода из строя оборудования в результате возникновения аварийной ситуации литьевые машины снабжаются системой защитных и предохранительных устройств. К ним относятся:

а) устройства, предотвращающие ожоги расплавом полимерного материала и нагретыми поверхностями литьевого оборудования (ограждения сопловой части, защитные кожухи нагревательного цилиндра, самозапирающиеся сопла);

б) устройства, предохраняющие литьевую машину от аварий в результате перегрузок (предохранительные клапана в гидросистеме, механизмы контроля сброса готового изделия);

в) устройства, предотвращающие травмирование обслуживающего персонала в рабочей зоне литьевой машины (подвижные и неподвижные ограждения механизма запирания, сблокированные с гидросистемой запирания формы);

г) устройства для защиты обслуживающего персонала от вибрации (амортизаторы) и воздействия токсичных летучих веществ (приточно-вытяжная вентиляция).

ГЛАВА 6

МАШИНЫ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ

6.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА РАЗДУВНОГО ФОРМОВАНИЯ

Методом раздувного формования изготавливают преимущественно тару самого различного назначения емкостью от нескольких кубических сантиметров до 3000 л: канистры, бочки, бидоны, бутылки, флаконы, тубы и др. Перерабатываются этим методом в основном полиолефины, поливинилхлорид, полистирол и его сополимеры.

Сущность метода поясняют приведенные на рис. 6.1 схемы, иллюстрирующие две основные его разновидности, отличающиеся способом формования заготовки будущего изделия.

На рис. 6.1, *а* приведена схема *экструзионно-раздувного формования.* Пластицирующий экструдер *1* подает расплав термопласта в головку *4*, откуда он выдавливается в виде трубчатой

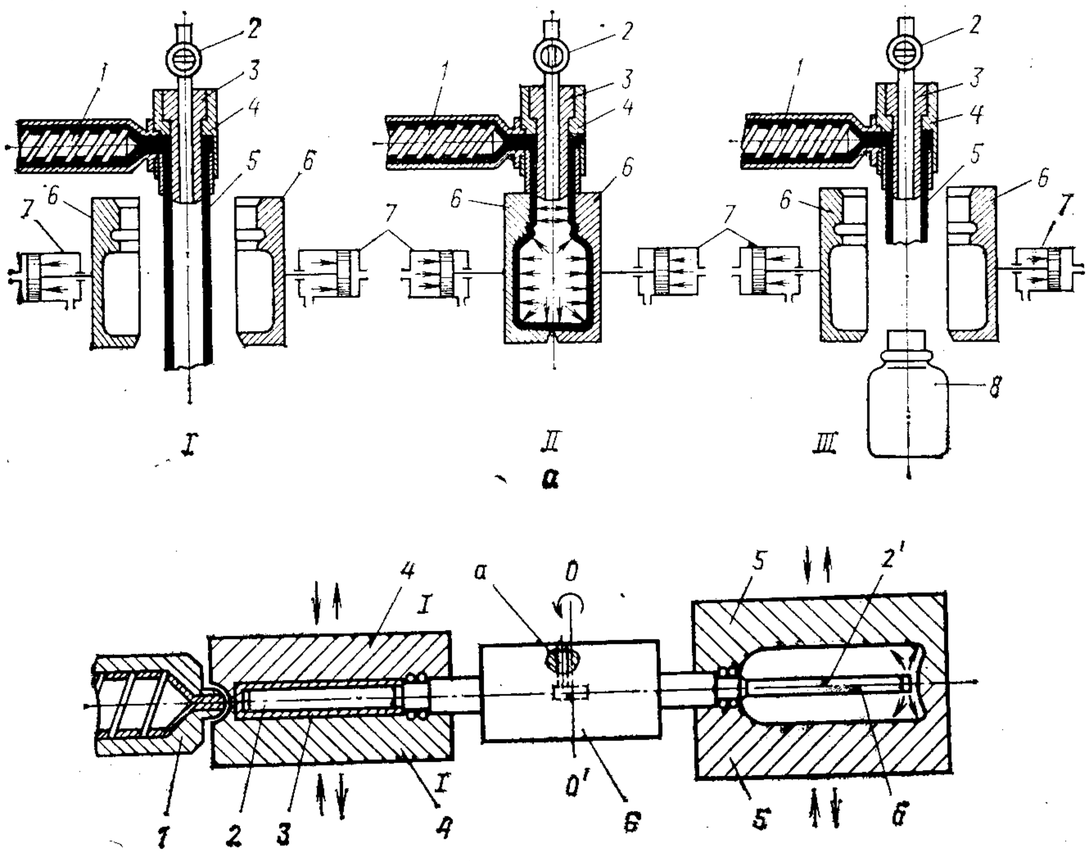


Рис. 6.1. Схемы метода раздувного формования:

а — экструзионно-раздувное формование (*1* — пластицирующий экструдер; *2* — кран; *3* — дорн; *4* — головка; *5* — заготовка; *6* — полуформы; *7* — пневмоцилиндры; *8* — изделие); *б* — формование литьем с раздувом (*1* — узел пластикации и впрыска литьевой машины; *2*, *2'* — сердечники; *3* — заготовка; *4* — литьевая форма; *5* — раздувная форма; *6* — поворотное устройство).

заготовки кольцевого сечения *5* в пространство между разомкнутыми полуформами *6* (поз. *I*).

Как только длина заготовки достигает требуемой величины, полуформы с помощью пневмоцилиндров *7* смыкаются (поз. *II*). При этом нижний конец заготовки пережимается и сваривается, а верхний ее конец плотно обжимается на выступающей части сердечника (дорна) *3* головки. Кран *2* открывается, и сжатый воздух через центральное отверстие в дорне *3* подается внутрь заготовки, раздувая и обжимая ее по холодной формообразующей поверхности формы. Происходит охлаждение и затвердевание материала отформованного изделия. Начиная с момента смыкания и вплоть до размыкания полуформ привод экструдера отключен и подача расплава отсутствует. Как только изделие становится достаточно формоустойчивым, пневмоцилиндры *7* раскрывают полуформы *6*, изделие *8* извлекается и вновь начинается экструзия заготовки (поз. *III*); цикл повторяется.

На рис. 6.1, *б* показан принцип формования литьем с раздувом. Две формы — литьевая *4* и раздувная *5* установлены на плитах узла смыкания литьевой машины. Между формами имеется поворотное устройство *6*, несущее на себе два противоположно направленных сердечника *2* и *2'*. Узел пластикации и впрыска литьевой машины *1* впрыскивает расплав в литьевую форму *4*, и в ней отливается заготовка *3*, по форме напоминающая пробирку. В это время в раздувной форме *5* формуется изделие из заготовки, отлитой в предшествующем цикле на сердечнике *2'*. Когда заготовка в форме *4* охладится до температуры, при которой возможен ее раздув, а изделие в форме *5* охладится до температуры, при которой возможно его изъятие, формы раскрываются, изделие извлекается из формы *5*, а отформованная заготовка остается на сердечнике *2*. Устройство *6* поворачивается вокруг оси *OO'* на 180°, и сердечник *2* с заготовкой переносится в раздувную форму *5*, а освободившийся сердечник *2'* — в форму *4*. Происходит смыкание форм, и через канал *а—б* подается воздух для раздува заготовки. В это время в литьевой форме отливается заготовка на сердечник *2'*. По завершении этих операций цикл повторяется.

Для формования литьем с раздувом используются, как правило, универсальные литьевые машины, конструкция которых рассмотрена в гл. 5.

Существует несколько технологических разновидностей метода, отличающихся способом приготовления заготовки и способом ее раздува. Возможны следующие способы приготовления заготовки: 1) экструзия ее с немедленным последующим раздувом (см. пример, приведенный выше); 2) разогрев предварительно экструдированной и охлажденной заготовки и подача ее на раздув; 3) изготовление заготовки литьем под давлением, частичное охлаждение в литьевой форме и перенос ее в раздувную форму; 4) сварка трубчатой заготовки из листа, нагрев ее

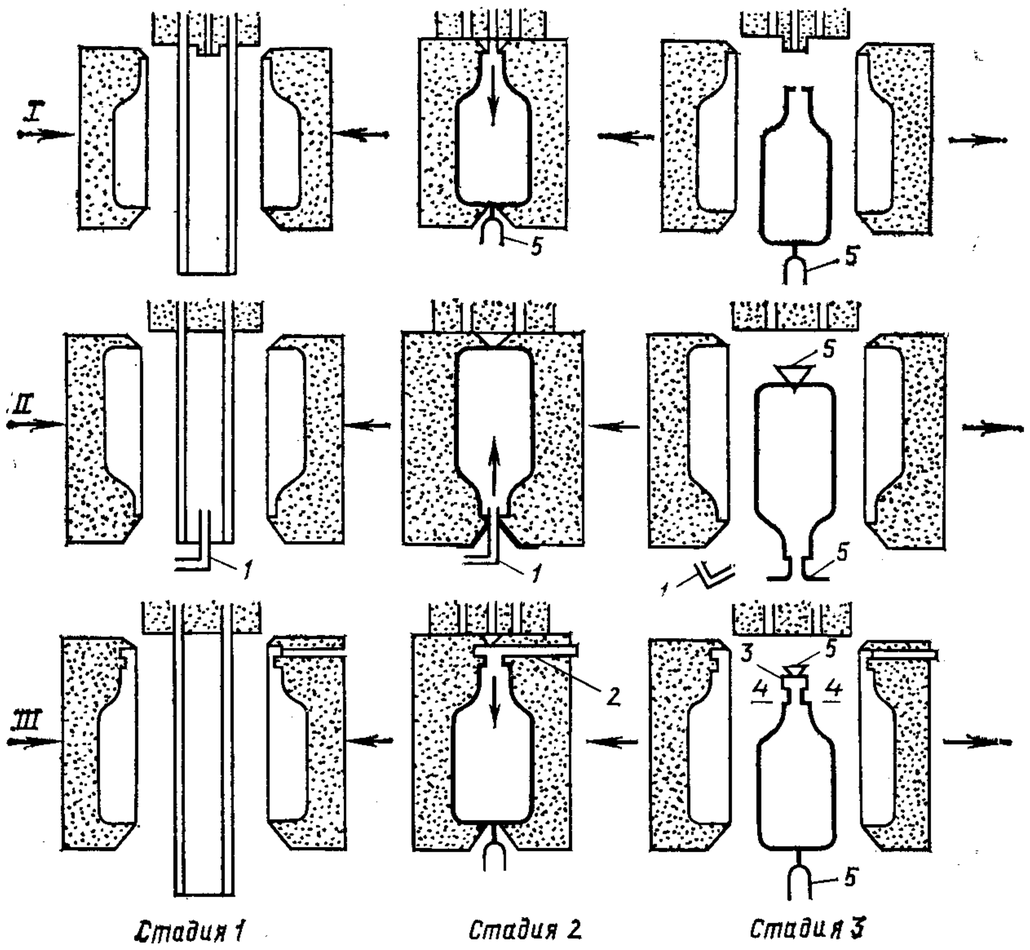


Рис. 6.2. Способы раздува заготовки:
I — через дорн; *II* — через ниппель; *III* — через иглу; *1* — ниппель; *2* — отверстие для введения иглы; *3* — дополнительная технологическая полость; *4—4′* — линия обреза; *5* — облой.

и подача в форму; 5) нагрев двух листовых заготовок, совмещение их и замыкание между полуформами с последующей подачей воздуха между заготовками.

Раздув заготовки в форме может осуществляться тремя способами (см. поз. *I—III* на рис. 6.2).

На поз. *I* показан раздув через дорн: воздух в заготовку подается через центральное отверстие в дорне.

На поз. *II* показан раздув через ниппель *1*: на стадии 1 экструдируемая заготовка как бы надевается на ниппель; на стадии 2 полуформы смыкаются, обжимая на ниппеле заготовку и формуя тем самым горловину, и в заготовку подается воздух; на стадии 3 ниппель отводится, форма раскрывается и изделие извлекается.

Раздувом через дорн и ниппель можно формовать только те изделия, которые должны иметь отверстия, причем относительно небольшого размера: очевидно, что диаметр горловины в изделии не должен быть больше внутреннего диаметра заго-

товки, в противном случае она не наделась бы на ниппель, который, раздувая заготовку, формует горловину.

На поз. *III* показан раздув через иглу, при котором получают изделия без функциональных отверстий или широкогорлую тару. Стадия 1 такая же, как и на поз. *I* и *II*. После смыкания форм на стадии 2 в отверстие *2* вводится полая игла, протыкающая заготовку. Через иглу подается воздух на раздув. На стадии 3 игла отводится, форма раскрывается и изделие извлекается. Если в изделии не должно быть отверстий, то прокол иглы диаметром 1,5—3 мм заваривается. Если же изделие должно иметь широкую горловину, то его отформовывают с дополнительной технологической полостью *3*, в которую и вводится игла. После извлечения изделия полость обрезают по линии *4—4*.

Недостатками метода являются разнотолщинность изделий из-за неоднородной степени вытяжки заготовки в различных местах, а также значительные отходы материала в виде неизбежного при этом методе облоя *5* (см. рис. 6.2).

6.2. ОБЩЕЕ УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭКСТРУЗИОННО-РАЗДУВНЫХ АГРЕГАТОВ

Все экструзионно-раздувные агрегаты включают в себя три основные сборочные единицы: пластицирующий экструдер, головку и приемно-раздувное устройство.

Чаще всего агрегаты конструируются на базе универсальных червячных машин, в качестве генераторов расплава используются также механизмы пластикации и впрыска литьевых машин, имеющих конструкцию типа «червяк — поршень» (см., например, рис. 5.3). В ряде случаев, например для машин, производящих особо большие изделия, приходится проектировать специализированные червячные пластикаторы.

В технике производства профильных изделий методом экструзии головку не причисляют к узлам основной машины, а считают сменным формующим инструментом, так как для производства каждого нового изделия нужна другая головка. При экструзии с раздувом одна головка используется в течение всего срока эксплуатации машины, а переход на новые диаметр и толщину заготовки осуществляют, сменяя лишь две детали головки: дорн и мундштук. По этой причине раздувные головки относят к сборочным единицам основного оборудования.

Назначение головки — сформовать заготовку расплава с однородной толщиной как по периметру сечения, так и по высоте или, иногда, с заданным характером изменения толщины по высоте и по периметру.

Приемно-раздувные устройства включают в себя несколько механизмов в соответствии с теми функциями, которые они выполняют: нож для отрезания участка заготовки, подлежащего формованию; механизм транспортирования заготовки от головки к форме, если последняя расположена не под формующим от-

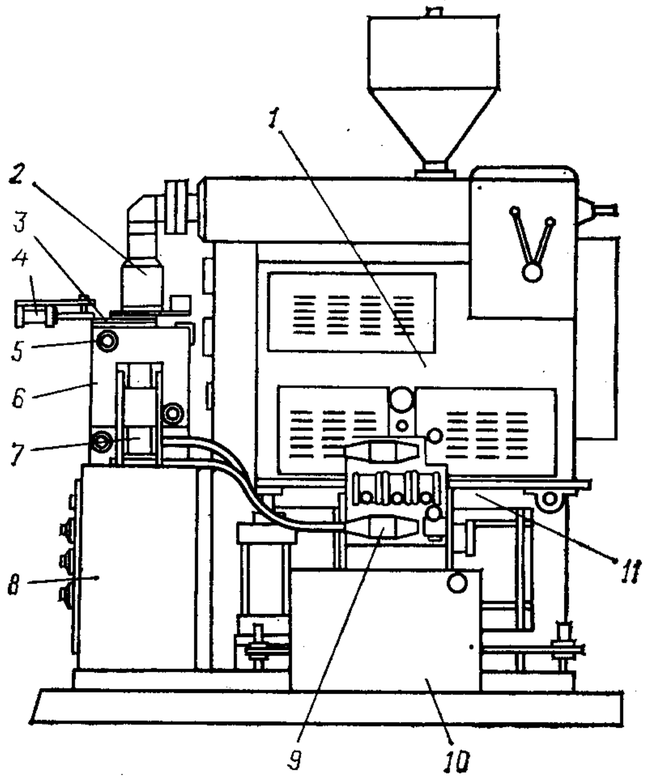


Рис. 6.3. Экструзионно-раздувной агрегат для производства изделий средней емкости:

1 — экструдер; *2* — головка; *3* — нож; *4* — пневмоцилиндр привода ножа; *5* — колонна; *6* — неподвижная плита; *7* — гидроцилиндр привода подвижных плит; *8* — шкаф с механизмами раздува и извлечения изделий с приборами электроавтоматики; *9* — блок золотниковых распределителей; *10* — масляный бак; *11* — подставка.

верстием головки; механизм смыкания и размыкания полуформ; механизм запирания форм (часто он объединен с механизмом смыкания и размыкания); устройство для перемещения механизма смыкания с позиции на позицию, если машина многопозиционная, т. е. если различные операции над изделием в форме выполняются в различных местах машины; механизм раздува заготовки; механизм отрыва облоя; механизм съема изделия и (иногда) ориентированной установки его на конвейер. Очевидно, что каждое конкретное приемно-раздувное устройство может и не иметь полного комплекта перечисленных механизмов.

Конструкция и взаимное расположение как основных сборочных единиц, так и отдельных механизмов в рамках каждой из них чрезвычайно разнообразны.

На рис. 6.3 показана общая компоновка экструзионно-раздувного агрегата для производства изделий емкостью 2—10 л. Агрегат оснащен универсальным экструдером *1*, установленным на подставке *11*. Формующее отверстие головки *2* расположено над полуформами приемно-раздувного устройства. Последнее включает в себя механизм смыкания форм. Крайние неподвижные плиты *6* механизма смыкания стянуты двумя расположенными по диагонали колоннами *5*, по которым перемещаются подвижные плиты с формой, приводимые в движение гидроцилиндром *7*. Гидропривод механизма смыкания состоит из масляного бака *10* с насосом и блока золотниковых распределителей *9*. Механизмы раздува изделия снизу через ниппель и извлечения изделия, а также приборы электроавтоматики расположены в шкафу *8*. На механизме смыкания укреплен нож *3* для обрезания заготовки на участке между формой и головкой. Нож приводится в действие от пневмоцилиндра *4*. Узел смы-

кания установлен стационарно, агрегат однопозиционный, цикл его работы такой же, как и у изображенного на рис. 6.1.

Основные недостатки описанного агрегата — это циклический режим работы экструдера с частыми включениями, что снижает температурную однородность расплава заготовки и ускоряет износ привода червяка, а также непроизводительные простои экструдера во время охлаждения в форме и узла смыкания во время выдачи заготовки.

Существуют два пути обеспечения непрерывного режима работы экструдера.

Первый путь целесообразен при производстве крупных изделий емкостью более 500 л, когда производительность одного или даже двух одновременно работающих в циклическом режиме экструдеров оказывается недостаточной для того, чтобы выдавить заготовку за требуемое время (о величине требуемого времени выдачи заготовки см. в разд. 6.4.1). В этом случае головку *2* оснащают копильником *6* (рис. 6.4). Один или два (как на рис. 6.4) экструдера *5* и *8* непрерывно подают расплав в копильник *6*. Из копильника посредством поршня гидроцилиндра *7* расплав периодически за требуемый отрезок времени выдавливается через головку *2* в пространство между плитами *1* узла смыкания, на которые крепятся полуформы.

Червяки экструдеров приводятся во вращение гидродвигателями *3* через редукторы *4*. Механизм раздува *10* расположен в нижней части приемно-раздувного устройства *9*. Для более равномерного распределения усилия запирания по площади крупногабаритных плит *1* каждая из них оснащена двумя гидроцилиндрами *11*.

Время выдачи заготовки в 2—5 раз меньше времени цикла работы машины, поэтому производительность экструдера, габа-

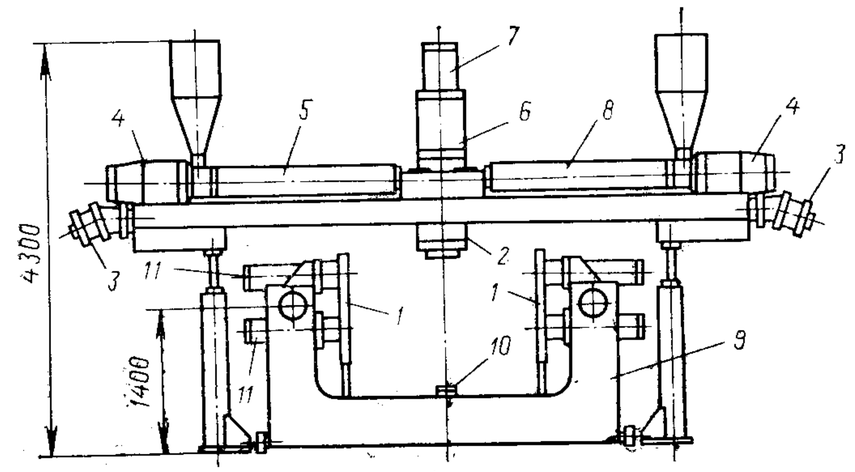


Рис. 6.4. Экструзионно-раздувной агрегат для производства изделий большой емкости:

1 — плиты узла смыкания; *2* — головка; *3* — гидродвигатели экструдеров; *4* — редукторы; *5*, *8* — экструдеры; *6* — копильник; *7* — гидроцилиндр для выдавливания расплава из копильника; *9* — приемно-раздувное устройство; *10* — механизм раздува; *11* — гидроцилиндры механизма запирания раздувной формы.

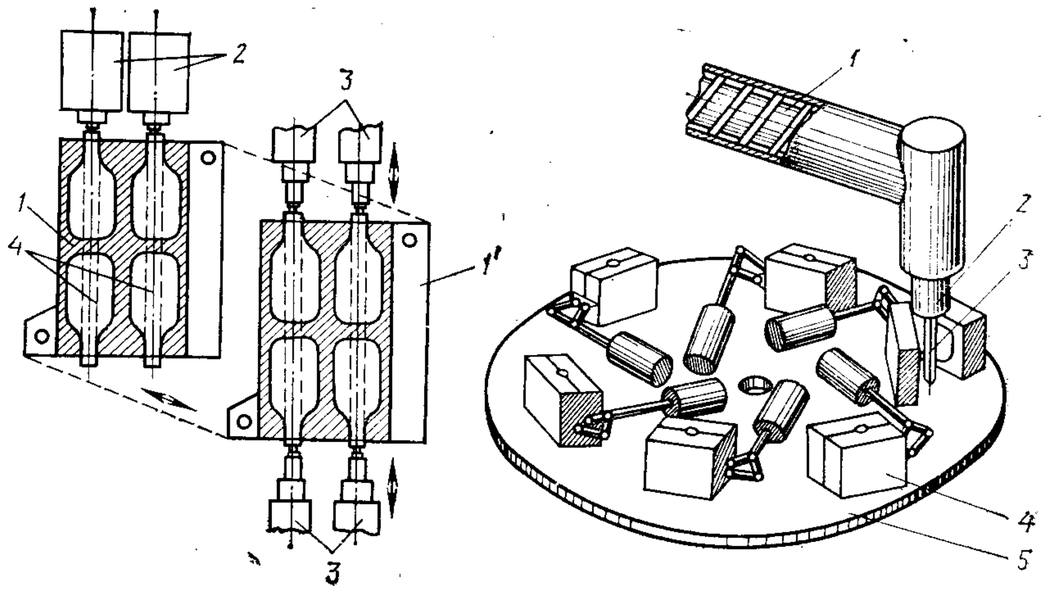


Рис. 6.5. Схема двухпозиционного экструзионно-раздувного агрегата для производства изделий средней емкости:
1, 1' — узлы смыкания; *2* — двухручьевая головка; *3* — ниппели; *4* — заготовки.

Рис. 6.6. Схема многопозиционного ротационного экструзионно-раздувного агрегата для производства мелких изделий:
1 — экструдер; *2* — головка; *3* — заготовка; *4* — форма; *5* — ротор.

риты и металлоемкость его при непрерывном режиме работы с копильником могут быть во столько же раз меньше, чем при циклическом режиме. Это очень важно для агрегатов большой мощности.

Второй путь целесообразен при производстве изделий емкостью менее 2 л, когда производительность экструдера больше или достаточна для непосредственной выдачи заготовки через головку без копильника за требуемое время. В этом случае агрегаты делают многопозиционными: экструдер с головкой, работая непрерывно, обслуживает последовательно два или более узлов смыкания с формами. Узлы смыкания выполняются подвижными, они подводятся к головке на время выдачи и захвата заготовки и затем отводятся от нее. Пример схем таких агрегатов для изделий емкостью 0,2—1,0 и 0,05—0,2 л приведен на рис. 6.5 и 6.6 соответственно.

Первый из агрегатов (см. рис. 6.5) имеет два узла смыкания *1* и *1'* с двумя комплектами четырехгнездных форм. В положении, показанном на рисунке, разомкнутый узел *1* расположен под головкой *2*, имеющей два формующих канала (два ручья); происходит выдача двух заготовок *4*. Сомкнутый узел *1'* с зажатыми в нем заготовками находится в контакте с раздувающими ниппелями *3*; произошел раздув заготовок и идет охлаждение изделий. По завершении указанных операций узел *1* смыкается и отходит влево вниз, захватывая заготовки и отрывая их от головки; здесь он входит в контакт со своим комплектом раздувающих ниппелей (на рисунке не показан). В то же время узел *1'* размыкается, и, сбросив изделия, перемещается влево вверх к головке, из которой продолжает выдаваться заготовка.

Такие двухпозиционные агрегаты рекомендуется проектировать, когда время выдачи заготовки примерно равно времени раздува и охлаждения изделия в форме. При производстве же мелких изделий производительность даже малых типоразмеров экструдеров оказывается столь большой, что время выдачи заготовки для одного изделия становится меньше времени охлаждения и съема изделия в 5—6 раз. Экструдер оказывается способным обслуживать 6—7 форм. Такие многопозиционные агрегаты чаще всего выполняют по ротационному типу (см. рис. 6.6). Экструдер *1* непрерывно выдает через головку *2* заготовку *3*. Ротор *5* с шестью позициями узлов смыкания прерывисто вращается, периодически останавливаясь на время выдачи заготовки в очередную подошедшую к головке раскрытую форму.

6.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСТРУЗИОННО-РАЗДУВНЫХ АГРЕГАТОВ

Можно выделить несколько признаков, по которым классифицируются экструзионно-раздувные агрегаты:

по способу раздува — с раздувом через головку, с раздувом через ниппель, с раздувом через иглу, универсальные агрегаты; по режиму работы экструдера — с циклическим режимом, с непрерывным режимом; по типу головки — с копильником, без копильника; по числу узлов смыкания форм — однопозиционные, двухпозиционные, многопозиционные; по способу доставки заготовки из головки в форму в одно- и двухпозиционных машинах — с перемещаемыми узлами смыкания, со стационарными узлами смыкания и механизмом отрыва и транспортирования заготовки, со стационарными узлами смыкания, расположенными непосредственно под головкой.

6.4. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ РАЗДУВНОГО ФОРМОВАНИЯ

6.4.1. Формование заготовки экструзионным методом

Заготовка, выходящая из головки, испытывает воздействие собственного веса, вследствие чего она вытягивается. Степень вытяжки заготовки неоднородна по высоте, поэтому заготовка получается разнотолщинной по высоте, что вносит свой вклад в общую разнотолщинность изделия. Чем медленнее экструдируется заготовка, тем длительнее действие силы тяжести, тем больше разнотолщинность. Таким образом, скорость экструзии заготовки должна быть такой, чтобы разнотолщинность последней не превышала допустимой величины. Ниже приводится анализ деформирования заготовки, результатом которого является

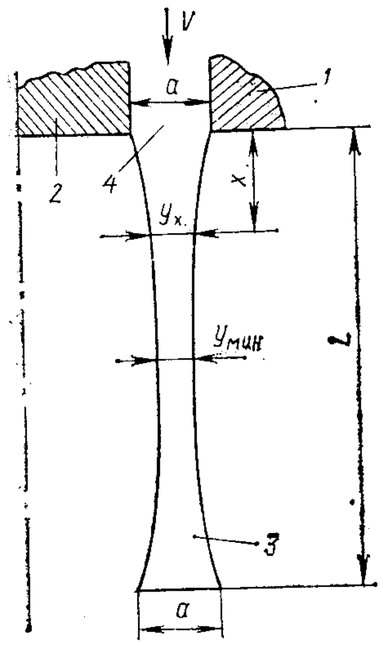


Рис. 6.7. Схема экструдирования заготовки:
1 — мундштук; *2* — дорн; *3* — заготовка; *4* — кольцевой формующий канал.

формула для расчета минимально допустимой скорости экструзии V_*.

На рис. 6.7 показано продольное сечение мундштука *1* и дорна *2* головки, а также заготовки *3*, выходящей из образованного ими кольцевого формующего канала *4*, имеющего ширину a. Средняя скорость расплава в канале V. К данному моменту времени t заготовка достигла длины L.

Степень утонения стенки заготовки в любом сечении ее с продольной координатой x пропорциональна весу заготовки ниже этого сечения (т. е. весу заготовки G_{L-x}, равному разности полного веса заготовки G_L и веса G_x участка ее на длине x), а также времени воздействия этого веса t_x, т. е. времени пребывания данного сечения вне канала головки.

Очевидно, что конец заготовки с координатой $x=L$ не утоняется, так как $G_L=0$. Верхний конец заготовки при $x=0$, несмотря на то, что на него действует максимальный вес, также не вытянулся, так как время воздействия на него этого веса t_x практически равно нулю. Максимальное утонение заготовки имеет место в средней части ее; здесь текущее значение y_x толщины заготовки минимально: $y_{мин}$.

Чем меньше скорость экструзии V, тем больше разнотолщинность заготовки z, количественное выражение которой примем следующим:

$$z = y_{мин}/a \tag{6.1}$$

Существует минимально допустимое значение скорости экструзии V_*, при котором разнотолщинность z достигает своей допустимой величины $[z]$:

$$V_* = V\big|_{z=[z]} \tag{6.2}$$

Установим необходимую для определения V_* связь между V и z.

Реологическое уравнение для находящегося в вязкотекучем состоянии материала заготовки при растяжении имеет вид

$$\sigma_x = \eta_p \dot{\varepsilon}_x, \qquad \dot{\varepsilon}_x = d\varepsilon_x/dt_x \tag{6.3}$$

где σ_x — нормальное растягивающее напряжение, действующее в поперечном сечении заготовки с координатой x; η_p — вязкость при растяжении; $\dot{\varepsilon}_x$ — скорость деформации растяжения ($\dot{\varepsilon}_x = d\varepsilon_x/dt_x$, где ε_x — относительная деформация удлинения в месте заготовки с этой же координатой x).

В ньютоновской области кривой течения расплавов термопластов (т. е. в области малых напряжений) соотношение между вязкостью при растяжении η_p и вязкостью при сдвиге $\eta_н$ таково:

$$\eta_p = 3\eta_н \tag{6.4}$$

Напряжения же в заготовке от силы тяжести настолько малы, что соотношение (6.4) можно считать справедливым и для рассматриваемого случая.

Из условия несжимаемости расплава при вытяжке объемная относительная деформация ε_V равна нулю:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_\varphi = 0 \tag{6.5}$$

где ε_y и ε_φ — относительные деформации в радиальном (y) и окружном (φ) направлениях соответственно.

Так как имеет место одноосное растяжение, то деформации в радиальном и окружном направлениях равны:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_\varphi \tag{6.6}$$

Вводя (6.6) в (6.5), получаем

$$\varepsilon_x = -2\varepsilon_y \tag{6.7}$$

Если соотношение (6.7) между деформациями ε_x и ε_y справедливо в любой момент времени, то такое же соотношение имеет место и между скоростями этих деформаций:

$$d\varepsilon_x/dt_x = -2d\varepsilon_y/dt_x \tag{6.8}$$

Выражение для $d\varepsilon_y$ очевидно:

$$d\varepsilon_y = dy_x/y_x \tag{6.9}$$

Рассматривая полоску заготовки единичной ширины в окружном направлении φ, можем записать следующее выражение для напряжения σ_x:

$$\sigma_x = G_{L-x}/(y_x \cdot 1) \tag{6.10}$$

Вводя выражения (6.9), (6.8) и (6.4) в правую часть реологического уравнения (6.3), а выражение (6.10) — в левую часть его, получаем

$$G_{L-x} = -6\eta_н (dy_x/dt_x) \tag{6.11}$$

С учетом того, что вес G_{L-x}, действующий на данное материальное сечение, не изменяется с возрастанием времени t_x, проинтегрируем (6.11) в очевидных пределах изменения y_x и t_x:

$$G_{L-x}\int_0^{t_x} dt_x = -6\eta_н \int_a^{y_x} dy_x, \quad \text{или} \quad G_{L-x}t_x = 6\eta_н (a - y_x) \tag{6.12}$$

Выражение для G_{L-x} зависит от скорости экструзии V и плотности расплава ρ следующим образом:

$$G_{L-x} = G_L - G_x = \rho g V a \cdot 1 \cdot t_L - \rho g V a \cdot 1 \cdot t_x = \rho g V a (t_L - t_x) \tag{6.13}$$

где g — ускорение свободного падения.

Вводя (6.13) в (6.12) и разрешая полученное выражение относительно y_x, получаем

$$y_x = a[1 - \lambda V (t_L - t_x) t_x] \tag{6.14}$$

где $\lambda = \rho g/(6\eta_н)$.

Для решения поставленной задачи отыскания связи между $z = y_{мин}/a$ и V, очевидно, необходимо определить выражение для $y_{мин}$. По правилам отыскания экстремума функции $y_x(t_x)$ значение координаты t_x, соответствующей экстремуму, таково:

$$t_x\big|_{y_x = y_{мин}} = t_x\big|_{dy_x/dt_x = 0} \tag{6.15}$$

В соответствии с этим, беря производную по t_x от выражения (6.14) и приравнивая ее к нулю, получаем

$$t_x\big|_{y_x = y_{мин}} = t_L/2 \tag{6.16}$$

Вводя (6.16) в (6.14), находим выражение для $y_{мин}$:

$$y_{мин} = za$$

где

$$z = 1 - \lambda V (t_L/2)^2 \tag{6.17}$$

Выражение (6.17) представляет собой искомую взаимосвязь между разнотолщинностью z и скоростью экструзии V, однако оно содержит время экструзии заготовки t_L, которое удобнее выразить через требуемую длину заготовки L, поскольку именно она известна на стадии подготовки к производству данного изделия.

Скорость нижнего конца заготовки V_L несколько больше, чем скорость экструзии V вследствие вытяжки заготовки, однако при малых степенях вытяжки это различие столь незначительно, что можно записать следующее приближенное соотношение:

$$t_L \approx L/V \tag{6.18}$$

Вводя (6.18) в (6.17), окончательно получаем

$$V = \rho g L^2/[24\eta_н(1-z)] \tag{6.19}$$

Вводя в выражение (6.19) величину допустимой разнотолщинности $[z]$, в соответствии с (6.2) получаем формулу для расчета минимально допустимой скорости экструзии V_*.

Если при проектировании экструзионно-выдувного агрегата производительность выбранного типоразмера экструдера недостаточна для продавливания расплава через формующий канал головки со скоростью V_*, то следует выбирать больший типоразмер экструдера или проектировать головку с копильником.

6.4.2. Формование заготовки литьевым методом

Процессы, происходящие в литьевой форме при отливке заготовки, принципиально такие же, как и при обычном литье под давлением (см. гл. 5). Существенное отличие заключается в том, что заготовка пребывает в форме меньшее время и охлаждается не до твердого состояния, а до температуры, близкой к температуре перехода из вязкотекучего состояния в высокоэластическое.

Тепло отводится от заготовки преимущественно через наружную ее поверхность, контактирующую с формой. Чтобы в процессе охлаждения на наружной поверхности не образовывался слой затвердевшего материала, препятствующий дальнейшему раздуву заготовки, температуру формы поддерживают несколько выше температуры затвердевания полимера (температуры кристаллизации или стеклования). В этом состоит второе отличие от традиционного метода литья под давлением.

Использование литьевого способа формования заготовки имеет то преимущество, что позволяет получать комбинированные изделия. Отдельные элементы этих изделий формуются литьем под давлением, а остальная часть — раздувом. Например, у бутылки, формование которой показано на рис. 6.1, *б*, горловина с резьбой формуется литьем под давлением, а основное тело — раздувом. В этом случае отливаемая часть изделия должна затвердевать полностью еще в литьевой форме, поэтому литьевые формы для таких изделий состоят из двух частей, контактирующих по плоскости *I—I* (см. рис. 6.1, *б*). Эти части

поддерживаются при разных температурах и поэтому должны иметь независимые системы охлаждения.

Другое преимущество литьевого формования заготовки заключается в том, что имеется возможность получать заготовку с любым требуемым распределением толщины стенки как по высоте, так и по периметру (необходимость в этом возникает при формовании изделий сложной конфигурации).

Еще одно преимущество литьевого формования заготовки состоит в том, что один из концов заготовки получается со сплошным дном. Дно изделия из таких заготовок не имеет сварного шва и поэтому более прочно. Изделия к тому же получаются без облоя.

Время впрыска расплава в литьевую форму исчисляется десятыми долями секунды и поэтому при составлении циклограммы работы агрегата может не учитываться. Время охлаждения заготовки в литьевой форме может быть рассчитано по формуле (5.13). В этой формуле в качестве температуры, до которой охлаждается изделие, следует принимать температуру перехода из вязкотекучего в высокоэластическое состояние. Следует также подставлять в формулу удвоенную толщину стенки заготовки, так как охлаждение ее одностороннее (сердечник системы охлаждения не имеет).

6.4.3. Раздув заготовки

При раздуве не все точки наружной поверхности заготовки *1* одновременно входят в контакт с холодной поверхностью раздувной формы *2* (рис. 6.8). В первую очередь входит в контакт область около точки *А* (рис. 6.8, *а*). В месте контакта у заготовки образуется тонкий слой охлажденного материала с повышенной вязкостью, поэтому при дальнейшем раздуве заготовки этот участок вытяжке практически не подвергается и, следовательно, не утоняется. Максимальную степень вытяжки и утонения имеют участки в области точек *Б* и *В*, входящие в контакт с формой в последнюю очередь и формующие углы изделия (рис. 6.8, *б*). Изделие вследствие рассмотренного механизма раздува заготовки получается разнотолщинным, что крайне нежелательно, так как необходимость обеспечения требуемой жесткости утоненных мест изделия приводит к неоправданному для остальной его части завышению толщины стенки заготовки и, следовательно, к перерасходу материала.

Таким образом, очевидно, что для получения равнотолщинного изделия заготовка не должна быть равнотолщинной, она должна характеризоваться изменением толщины по высоте, показанным на рис. 6.8, *в*.

Подобная же ситуация возникает и при раздуве изделий сложной конфигурации (рис. 6.9). Степень вытяжки заготовки при раздуве во время формования изделия, показанного на рис. 6.9, *а*, различна в различных местах по высоте. Так, в ме-

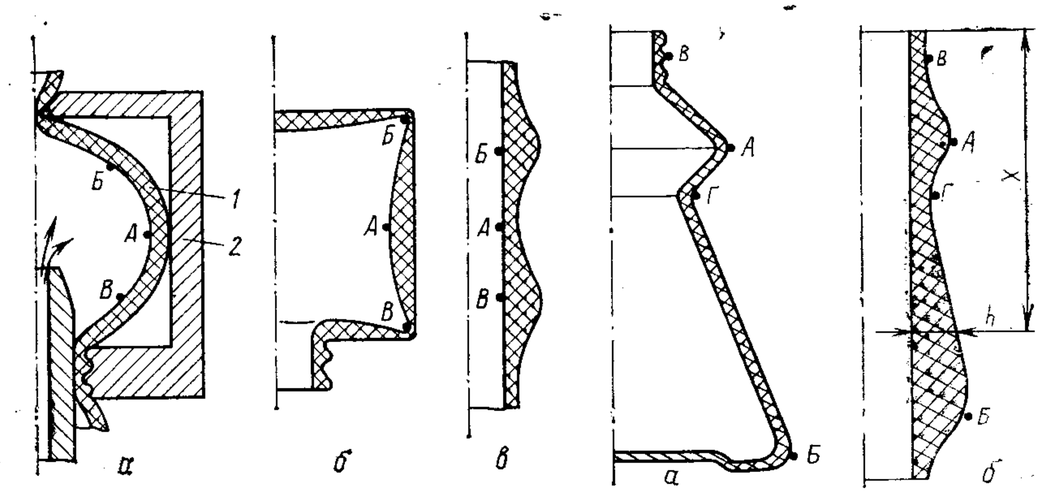


Рис. 6.8. Схема образования разнотолщинности изделия при раздуве заготовки. Пояснения в тексте.

Рис. 6.9. Изделие сложной конфигурации (*а*) и заготовка для его формования способом раздува (*б*).

стах, соответствующих точкам на изделии *А* и *Б*, вытяжка и, следовательно, утонение заготовки наибольшие, а в местах *В* и *Г* — наименьшие. Ясно поэтому, что для получения равнотолщинного изделия необходимо, чтобы заготовка имела конфигурацию, показанную на рис. 6.9, *б*.

Приближенное определение требуемого характера разнотолщинности заготовки в виде функции $h(x)$, где h — толщина заготовки при некоторой координате x по высоте ее, возможно, например, путем графического построения конфигурации заготовки на различных стадиях ее раздува в форме. Однако учет при этом еще и вытяжки заготовки под действием собственного веса делает задачу об определении функции $h(x)$ очень сложной. По этой и ряду других причин всегда стремятся экструдировать заготовку при условиях, обеспечивающих практическое отсутствие ее вытяжки (см. разд. 6.4.1).

Получение заготовок с требуемой разнотолщинностью литьевым способом не представляет сложности. Конструкция же головок и приемы получения таких заготовок экструзионным способом приведены в разд. 6.6.4.

6.4.4. Охлаждение изделия

Изделие в форме охлаждается, контактируя наружной стороной с холодной формообразующей поверхностью формы, а внутренней стороной — с раздувающим заготовку холодным воздухом. Однако теплоотдача от полимера воздуху столь мала по сравнению с теплоотдачей стенке, что ею можно пренебречь при расчете времени охлаждения изделия. Это время можно рассчитывать по формуле (5.13), принимая в ней, как указано в разд. 6.4.2, удвоенное значение толщины стенки изделия.

При охлаждении в форме, пока материал изделия не достиг еще температуры затвердевания, уменьшение объема материала не вызывает линейной усадки размеров изделия, так как давление раздувающего воздуха прижимает не затвердевшее еще изделие к форме. Однако на завершающей стадии охлаждения изделия от температуры стеклования до температуры, при которой оно становится достаточно формоустойчивым и может быть изъято из формы, давление воздуха уже оказывается неспособным препятствовать термической усадке и уменьшению размеров изделия. Изделие отстает от формы, и интенсивность теплообмена между ними уменьшается. По этой причине время охлаждения, рассчитанное по формуле (5.13), оказывается заниженным по сравнению с реальным на 15—25%.

6.5. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ЦИКЛОГРАММЫ АГРЕГАТА

Принципиальное конструктивное оформление агрегатов существенно зависит от габаритов и емкости изготавливаемых на них изделий.

При производстве изделий емкостью до 0,5 л производительность экструдера (даже малого типоразмера) столь велика, что время выдачи заготовки $t_{выд}$ оказывается гораздо меньшим, чем максимально допустимое время выдачи t_*, определяемое формулой

$$t_* = L/V_* \qquad (6.20)$$

где L — длина заготовки; V_* — минимально допустимая скорость экструзии [см. формулы (6.2), (6.19)].

По этой причине головки агрегатов для производства таких изделий копильника не имеют. Более того, время выдачи заготовки $t_{выд}$ оказывается в несколько раз меньшим, чем время охлаждения изделий в форме $t_{охл}$, указания по расчету которого даны в разд. 6.4.4. Таким образом, если экструдер работает в непрерывном режиме, что предпочтительно, то он способен обслуживать последовательно несколько форм. По этой причине агрегаты для малых изделий выполняют многопозиционными (см., например, рис. 6.6). На первой позиции агрегата осуществляется выдача заготовки из головки в форму и смыкание ее, на второй — раздув заготовки в форме, на последней — раскрытие формы и извлечение из нее готового изделия; на промежуточных позициях формы закрыты и в них происходит охлаждение изделия.

Время выстоя стола (или ротора) с формами $t_в$ должно быть не меньше, чем время выполнения машинных операций на каждой из позиций. Наиболее длительны эти операции на позиции выдачи заготовки и приема ее в форму, поэтому $t_в$ определяется по формуле

$$t_в = t_{выд} + t_{см} \qquad (6.21)$$

где $t_{выд}$ — время выдачи заготовки; $t_{см}$ — время смыкания формы.

Охлаждение изделия в форме осуществляется непрерывно как во время поворота стола при переводе форм на очередную позицию $t_п$, так и во время выстоя его, поэтому справедливо следующее равенство:

$$t_{охл} = n_1 (t_п + t_в) + t_п \qquad (6.22)$$

где n_1 — число позиций, на которых происходит охлаждение изделия; последнее слагаемое $t_п$ соответствует переводу формы на последнюю позицию раскрытия формы и съема изделия.

Вводя (6.21) в (6.22) и разрешая последнее относительно n_1, получаем

$$n_1 = (t_{охл} - t_п)/(t_п + t_{выд} + t_{см}) \qquad (6.23)$$

Общее число позиций n равно

$$n = n_1 + n_2 \qquad (6.24)$$

где n_2 — число позиций, на которых выполняются машинные операции.

В рассматриваемом примере $n_2 = 3$ (первая, вторая и последняя позиции). В некоторых типах машин раздув выполняется на первой позиции после смыкания форм. В этом случае $n_2 = 2$, а в формуле (6.21) появляется третье слагаемое $t_{разд}$ — время раздува.

Время выдачи заготовки $t_{выд}$ определяется по формуле

$$t_{выд} = v/Q \qquad (6.25)$$

где v — объем материала заготовки, равный объему материала в изделии с добавлением около 5—7% на облой; Q — производительность типоразмера экструдера, которым оснащается агрегат.

Производительность Q может быть рассчитана с учетом гидравлического сопротивления головки по формуле (4.55).

Штучная производительность многопозиционных машин $Q_{шт}$ определяется по формуле

$$Q_{шт} = (t_в + t_п)^{-1} \qquad (6.26)$$

При формовании изделий средних размеров (емкостью до 20 л) масса заготовок и, следовательно, время их выдачи $t_{выд}$ достаточно велики, так что $t_{выд}$ становится сопоставимым со временем всех операций, которые выполняются узлом смыкания и раздува в течение одного цикла. Для изготовления таких изделий целесообразно конструировать одно- или двухпозиционные агрегаты с перемещаемыми узлами смыкания или со стационарными узлами смыкания и механизмом отрыва и транспортирования заготовки (см., например, рис. 6.5).

Основными условиями оптимальности конструкции агрегатов названного типа являются: минимальность типоразмера червячной машины, входящей в состав агрегата; работа червяка в непрерывном режиме; отсутствие непроизводительных выстоев приемно-раздувных механизмов; отсутствие (там, где это возможно) копильника, усложняющего конструкцию агрегата и

управление им; выдача заготовки за время, меньшее или равное максимально допустимому значению t_* [см. формулу (6.20)]:

$$t_{выд} \leqslant t_* \qquad (6.27)$$

Второе и третье условия формулируются следующим образом:

$$t_н + t_{выд} = t_ц/n \qquad (6.28)$$

$$t_ц = \sum_{i=1}^{m} t_i \qquad (6.29)$$

где $t_н$ — время набора дозы расплава в копильнике; $t_{выд}$ — время выдачи заготовки из головки; n — число приемно-раздувных механизмов; $t_ц$ — время цикла работы приемно-раздувного механизма; m — число машинных операций, выполняемых приемно-раздувным механизмом; t_i — времена этих операций.

В случае отсутствия копильника $t_н = 0$, а под $t_{выд}$ понимается время выдавливания заготовки из головки вращающимся червяком экструдера. Для одно- и двухпозиционных машин с перемещаемыми узлами смыкания эти операции включают в себя подвод механизма с раскрытой формой к головке, смыкание форм с захватом заготовки, отвод механизма, раздув заготовки в форме, выстой для охлаждения изделия, размыкание форм, съем изделия.

Типы конструкций, удовлетворяющие отмеченным условиям, различны в зависимости от значения k, равного

$$k = t_ц/t_* \qquad (6.30)$$

Эти типы следующие:

1) $k < 1$; а) однопозиционный без копильника, б) двухпозиционный без копильника;

2) $1 < k < 2$; а) однопозиционный с копильником, б) двухпозиционный без копильника;

3) $2 < k$; а) однопозиционный с копильником, б) двухпозиционный с копильником.

Окончательный выбор типа конструкции в рамках каждого из пунктов 1—3 определяется производительностью, которую должен обеспечить агрегат: двухпозиционные машины в два раза более производительны, чем однопозиционные.

Общий порядок выбора конструкции агрегата и типоразмера червячной машины, которой необходимо его оснастить, следующий. Исходными данными являются габариты изделия, намечаемого к изготовлению на проектируемом агрегате, объем материала изделия v, ньютоновская вязкость $\mu_н$ и плотность ρ расплава при температуре экструзии из головки, ориентировочная штучная производительность N, которую должен обеспечить агрегат. По габаритам изделия конкретизируют длину заготовки L и объем отходов в виде облоя $v_о$. По формулам (6.19), (6.2) вычисляют минимально допустимую скорость выдачи заготовки V_*, принимая при этом $[z] = 0{,}95 \div 0{,}97$. По формуле

(6.20) находят максимально допустимое время выдачи t_*. По формуле (6.29) вычисляют $t_ц$, причем время самой длительной операции $t_{охл}$ рассчитывают по рекомендациям, приведенным в разд. 6.4.4.

Определяют значение k по формуле (6.30) и выбирают возможный тип конструкции в рамках приведенных выше пунктов 1—3.

Рассчитывают позиционность агрегата n из условия

$$N = n/t_ц \qquad (6.31)$$

тем самым окончательно определяя тип его конструкции. Если по (6.31) $n<1$, то принимают однопозиционный агрегат, если же $1<n<3$, то двухпозиционный.

Выбор типоразмера червячной машины несколько различается для агрегатов с копильником и без него. Для агрегатов без копильника по формуле (6.28) при $t_н=0$ рассчитывают $t_{выд}$ и определяют объемную производительность червячной машины Q:

$$Q = (v + v_0)/t_{выд} \qquad (6.32)$$

По производительности подбирают червячную машину.

Для агрегатов с копильником из формулы (6.28) видно, что чем меньше время выдачи заготовки из копильника $t_{выд}$, тем большим может быть время набора дозы в копильнике $t_н$ и тем, следовательно, можно использовать меньший типоразмер машины (см. первое условие оптимальности конструкции агрегата). Время $t_{выд}$ обратно пропорционально давлению на расплав в копильнике, которое создает привод. Это давление, однако, нецелесообразно принимать большим 40 МПа. Воспользовавшись одним из известных методов гидравлического расчета головок при известных размерах каналов проектируемой головки, вычисляют расход через нее $Q_г$ и затем время выдачи $t_{выд}$:

$$t_{выд} = (v + v_0)/Q_г \qquad (6.33)$$

При известном $t_{выд}$ (по 6.28) находят $t_н$ и затем производительность Q машины

$$Q = (v + v_0)/t_н \qquad (6.34)$$

по которой выбирают ее типоразмер.

Агрегаты для крупных изделий (объемом более 20—50 л), как правило, однопозиционные. Длительность цикла работы приемно-раздувного механизма $t_ц$ у них намного превосходит максимально допустимое время выдачи заготовки t_*, поэтому все они выполняются, во-первых, с копильником, во-вторых, со стационарными узлами смыкания, расположенными непосредственно под головкой. Время цикла $t_ц$ в этом случае является временем цикла работы всего агрегата и включает в себя $t_{выд}$.

6.6. ГОЛОВКИ ДЛЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ЗАГОТОВОК

6.6.1. Головки без копильника

На рис. 6.10 приведен пример такой головки. Она соединяется с цилиндром экструдера *3* с помощью разъемного в диаметральной плоскости хомута *2*. Между головкой и экструдером установлена зажатая переходником *5* решетка *4* с сеткой для фильтрации расплава. Левее осевой линии *OO′* показан вариант конструкции без регулирования, а правее — с регулированием толщины стенки заготовки.

Расплав, проходя последовательно канал переходника *А*, распределительный и подводящий каналы *Б* и *В*, поступает в формующий канал *Г*, образованный мундштуком *8* и дорном *7*. Винтами *6* и *6′* возможно радиальное смещение мундштука относительно дорна для выравнивания толщины заготовки по ее периметру.

Во втором варианте формующий канал образован коническими поверхностями мундштука и дорна. Вертикальным смещением дорна относительно мундштука можно изменять высоту канала и, следовательно, толщину стенки заготовки. Дорн

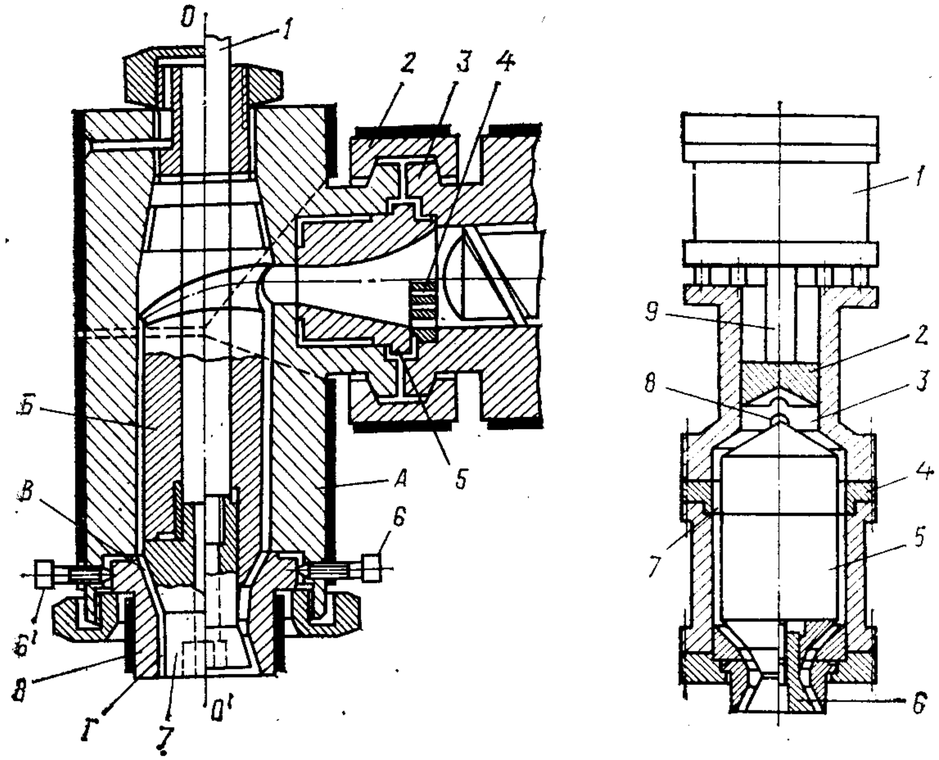


Рис. 6.10. Головка для экструзионного формования заготовки:
1 — штанга; *2* — хомут; *3* — цилиндр экструдера; *4* — решетка; *5* — переходник; *6, 6′* — винты; *7* — дорн; *8* — мундштук.

Рис. 6.11. Головка с копильником для экструзионного формования заготовки:
1 — гидроцилиндр; *2* — материальный поршень; *3* — полость копильника; *4* — фланец рассекателя; *5* — рассекатель; *6* — дорн; *7* — отверстия в рассекателе; *8* — отверстие, соединяющее пластикационный цилиндр экструдера с полостью копильника; *9* — шток.

перемещается посредством штанги *1*, которая может иметь различный привод. Если смещение производится при переходе от одного изделия к другому, то оно осуществляется с помощью пары винт — гайка. Если же при получении заготовки с требуемым характером разнотолщинности смещение реализуется непрерывно в течение всего времени выдачи заготовки, то приводом могут быть гидроцилиндр двойного действия или кулачковый механизм.

Все гидравлические и прочностные расчеты раздувных головок ничем не отличаются от таковых для прочих типов головок.

6.6.2. Головки с копильником

В показанной на рис. 6.11 головке имеется полость *3*, в которую подается расплав из экструдера через отверстие *8*. При накоплении расплава материальный поршень *2*, соединенный со штоком *9* гидроцилиндра *1*, отжимается вверх, высвобождая объем для накапливаемой дозы. Дорн *6* укреплен на рассекателе *5* с фланцем *4*, в котором имеются отверстия *7* для прохода расплава.

При подъеме штока *9* вверх укрепленный на нем поводок (на чертеже не показан) нажимает на конечный выключатель, который дает команду на прекращение набора дозы. Изменяя положение конечного выключателя по высоте, можно устанавливать требуемый объем дозы.

6.6.3. Многоручьевые головки

Эти головки делятся на три типа: с попеременно работающими ручьями, с одновременно работающими ручьями, комбинированные.

Головка первого типа показана на рис. 6.12. Она предназначена для работы совместно с двухпозиционным приемно-раздувным устройством. В положении, показанном на рисунке, расплав из экструдера *1* через канал *2* поступает в трехходовой пробковый кран *3*, которым направляется в канал *4* левого ручья головки. Происходит выдача заготовки через этот ручей. В это время канал *5* правого ручья перекрыт краном; в форме под этим ручьем происходит раздув и охлаждение изделия. При повороте крана на 90° левый ручей *4* перекрывается, и расплав подается в правый ручей *5*. Назначение винтов *6* и *6′* такое же, как и винтов *6* и *6′* у головки, показанной на рис. 6.10.

Если бы крана *3* не было, то расплав подавался бы одновременно в оба ручья. Головка относилась бы ко второму типу и обслуживала бы механизм смыкания с формой на два изделия.

В двух- и многоручьевых головках с одновременной работой ручьев необходимо обеспечивать одновременность завершения

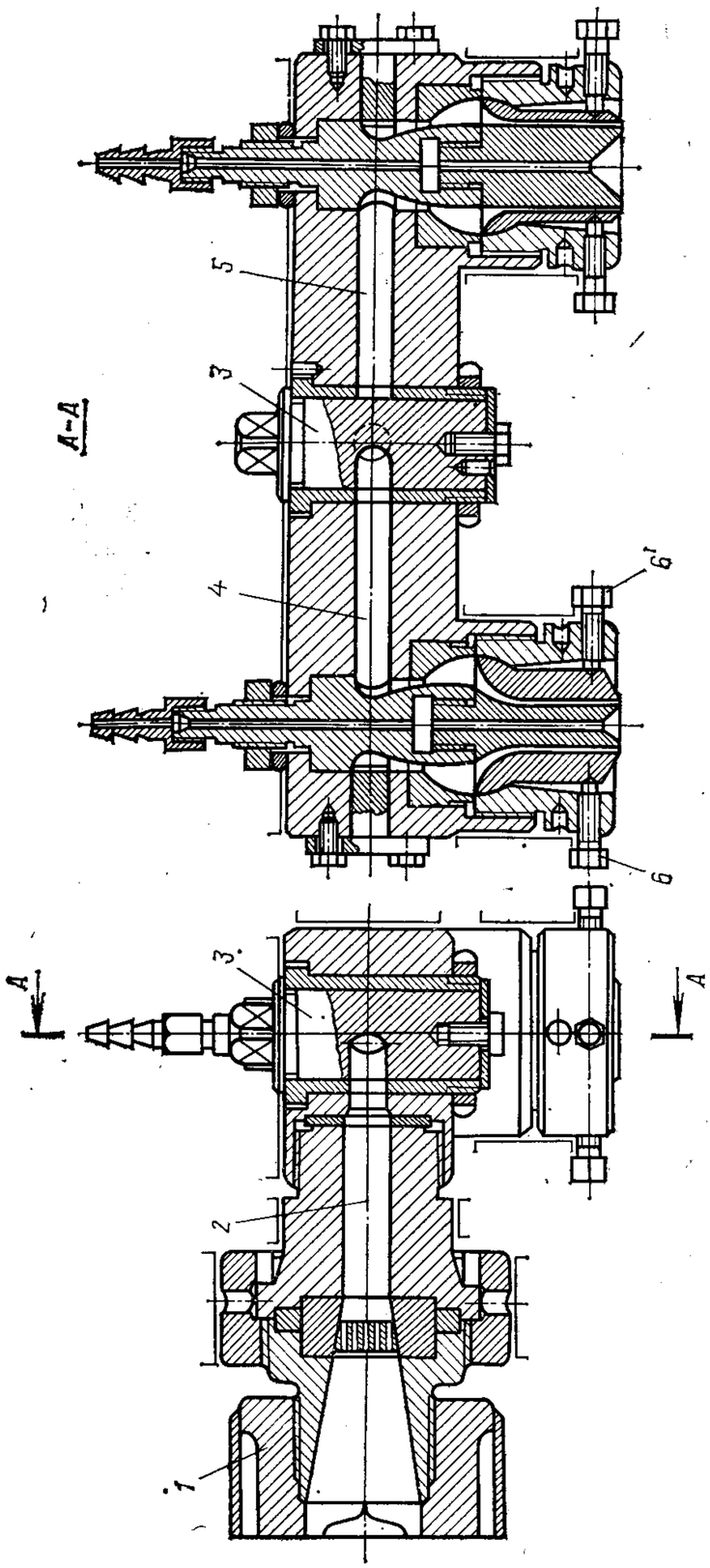


Рис. 6.12. Двухручьевая головка с попеременно работающими ручьями:
1 — экструдер; *2, 4, 5* — каналы головки; *3* — трехходовой пробковый кран; *6, 6′* — регулировочные винты,

выдачи заготовок во всех ручьях. В связи с этим возникает необходимость регулировать расход через каждый из ручьев. Например, если в приведенной на рис. 6.12 головке скорость экструзии заготовки через левый ручей оказывается несколько больше, чем через правый, то необходимо уменьшать расход через левый ручей до уравнивания линейных скоростей экструзии обеих заготовок.

В показанной на рис. 6.13 головке второго типа — восьмиручьевой головке с одновременной работой ручьев — независимое регулирование расхода через каждый ручей достигается изменением гидравлического сопротивления канала ручья. Ввинчивание корпуса дорна *1* в тело головки *2* приводит к уменьшению проходного сечения канала в месте *А*, т. е. возрастанию гидравлического сопротивления и, следовательно, уменьшению расхода.

Головка третьего, комбинированного типа показана на рис. 6.14. Расплав из экструдера *3* поступает в кран *7* с приводом от пневмоцилиндра *4*, которым попеременно направляется в правую *5* или левую *2* ветви канала головки. Каждая ветвь питает свою секцию (*6* или *1* соответственно) с тремя одновременно работающими ручьями.

6.6.4. Головки с программным управлением рабочими органами

Показанная на рис. 6.15, *а* головка с копильником *7* предназначена для получения заготовки с требуемым изменением толщины стенки по ее высоте. Изменение толщины стенки заготовки

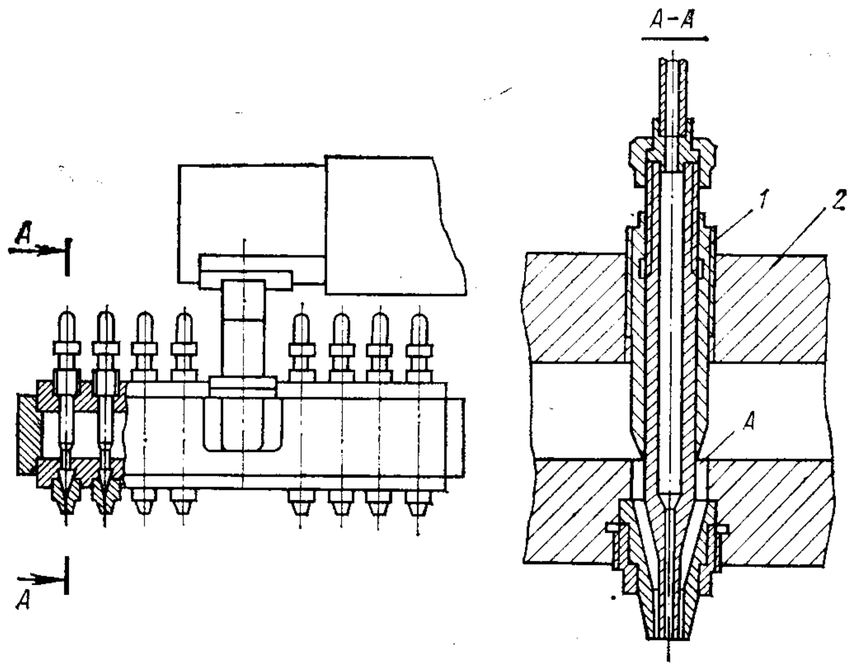


Рис. 6.13. Восьмиручьевая головка с регулированием расхода в каждом из ручьев:
1 — дорн; *2* — головка.

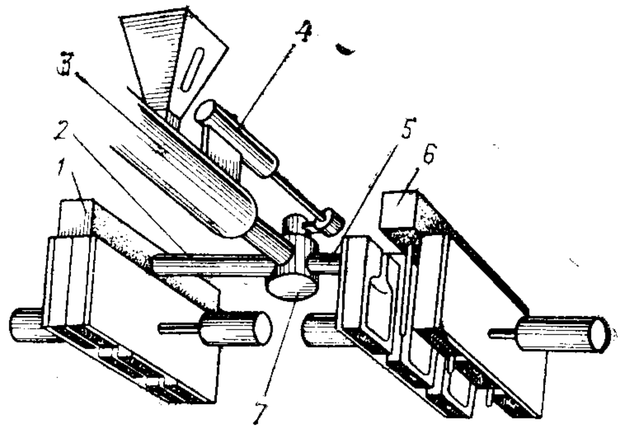


Рис. 6.14. Многоручьевая головка комбинированного типа:
1, 6 — трехручьевые секции головки; *2, 5* — подводящие каналы головки; *3* — экструдер; *4* — пневмоцилиндр; *7* — трехходовой кран.

в процессе ее экструзии достигается путем осевого смещения дорна *9* относительно мундштука *10*. Расплав поступает из экструдера в канал *Б* и затем в кольцевой канал, образованный держателем дорна *4* и втулкой *6*. Попав затем в полость *7* копильника, расплав отжимает кверху поршень копильника *5*, связанный тремя штангами *11* с поршнем *12* гидроцилиндра копильника *3*.

После накопления требуемой дозы подача расплава прекращается и начинается выдача заготовки. Масло под требуемым давлением подается в полость *А* гидроцилиндра *3*, и поршень *5* начинает выдавливать расплав из копильника через формующий канал. Дорн при этом непрерывно смещается вверх или вниз гидроцилиндром двойного действия *2*, шток поршня которого *1*, проходя насквозь через держатель *4*, связан с дорном *9* резьбовым хвостовиком *8*. Другой конец штока, выходя из верхней части цилиндра *2*, связан с датчиком текущего положения дорна, непрерывно подающим эту информацию в систему, обеспечивающую программное изменение положения дорна.

Схема программного изменения положения дорна показана на рис. 6.15, *б*. Расплав подается экструдером *1* в головку *2* без копильника, из которой выходит заготовка *4*. Подвижный дорн *3* связан с поршнем гидроцилиндра *5*, управляемого реверсивным золотниковым распределителем *10*, имеющим электромагнитный привод *11*. Масло под давлением поступает в распределитель от насоса *12*. Дорн имеет также датчик *6* положения его относительно мундштука, посылающий непрерывный сигнал в блок сравнения *8*. В блок *9* заранее закладывается программа в виде функции $S_п = S_п(t)$, где $S_п$ — программируемое положение дорна, t — время. В момент начала экструзии эта программа из блока *9* в виде электрического сигнала начинает выдаваться в блок сравнения *8*, который сравнивает сигнал программы $S_п(t)$ с сигналом $S_ф(t)$ от датчика *6* ($S_ф$ — фактическое положение дорна) и в случае расхождения этих сигналов дает команду на гидрораспределитель и, следовательно, на перемещение дорна до восстановления равенства между двумя указанными сигналами. Самописец *7* записывает фактическое перемещение дорна $S_ф(t)$ с целью возможности корректирования программы, если распределение толщины по высоте получаемого изделия не отвечает заданному.

6.7. МЕХАНИЗМЫ СМЫКАНИЯ

Функции, выполняемые механизмами смыкания раздувных агрегатов, принципиально такие же, как и у литьевых машин: смыкание и размыкание полуформ до требуемого, желательно регулируемого расстояния между ними; запирание сомкнутых полуформ усилием, достаточным, чтобы противостоять распорному усилию в полуформах от давления раздувающего воздуха.

Имеется еще и дополнительное требование к механизмам смыкания раздувных агрегатов: обе плиты, на которых крепятся полуформы, должны быть подвижными, причем смыкаться они должны одновременно таким образом, чтобы плоскость смыкания в момент входа полуформ в контакт совпадала с осью выдавленной заготовки. В противном случае будет происходить

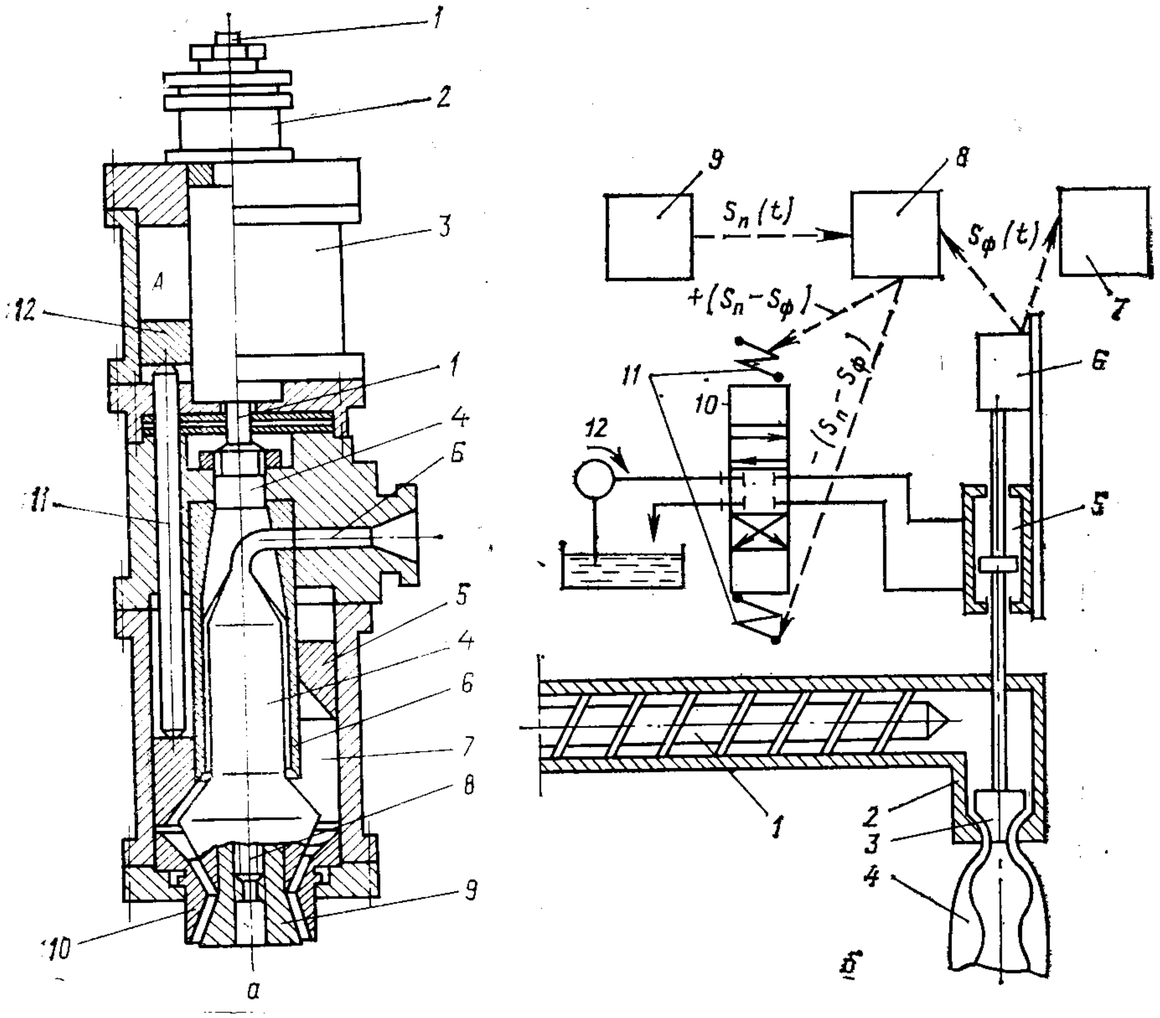


Рис. 6.15. Головка с программным регулированием толщины стенки заготовки: *а* — конструкция головки (*1* — шток поршня гидроцилиндра; *2* — гидроцилиндр управления дорном; *3* — гидроцилиндр копильника; *4* — держатель дорна; *5* — поршень копильника; *6* — втулка; *7* — полость копильника; *8* — резьбовой хвостовик штока; *9* — дорн; *10* — мундштук; *11* — штанга; *12* — поршень гидроцилиндра); *б* — схема программного изменения положения дорна (*1* — экструдер; *2* — головка; *3* — дорн; *4* — заготовка; *5* — гидроцилиндр; *6* — датчик положения дорна; *7* — самописец; *8* — блок сравнения; *9* — блок задания программы изменения толщины заготовки; *10* — реверсивный золотниковый распределитель; *11* — электромагнитный привод распределителя; *12* — насос).

смещение заготовки до момента смыкания и нарушение ее симметрии, что приведет к поперечной разнотолщинности изделия. Симметричность смыкания плит относительно оси заготовки обеспечивается специальными механизмами синхронизации, причем каждая плита, как правило, имеет свой привод.

Машины малых и средних типоразмеров имеют механизмы смыкания с непосредственным приводом от пневмо- или гидроцилиндров, как показано на рис. 6.16. У больших машин эти механизмы чаще всего коленчаторычажного типа и подобны по конструкции таковым у литьевых машин.

Кинематический, силовой и прочностной расчеты этих механизмов также подобны аналогичным расчетам для литьевых машин (см. гл. 5). Исходной при расчетах является величина требуемого усилия запирания форм F, которую можно определить по формуле $F=ps$ (где p — давление раздувающего воздуха, s — площадь проекции формуемого изделия на плоскость, перпендикулярную направлению смыкания плит).

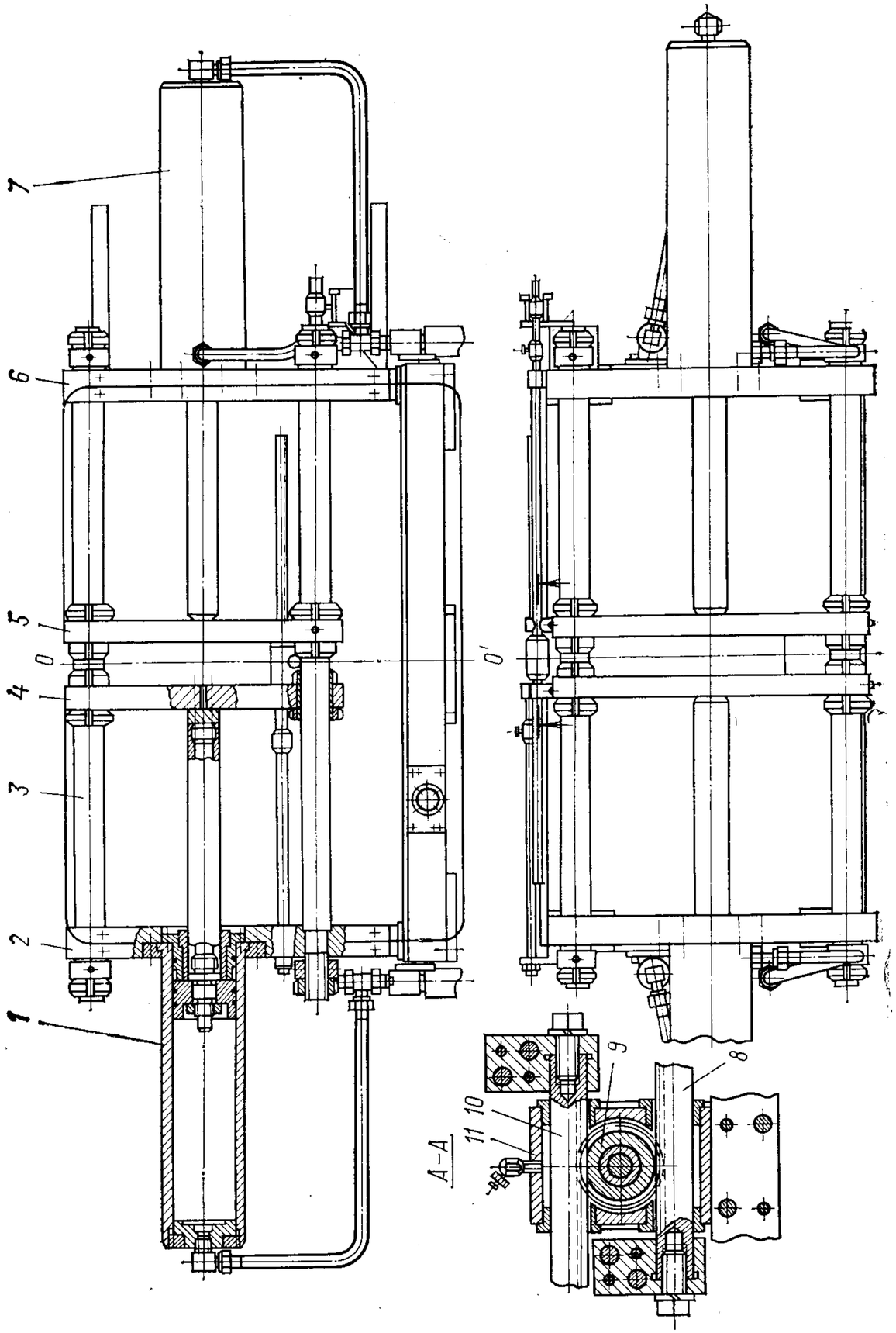
Показанный на рис. 6.16 механизм смыкания состоит из двух неподвижных плит *2* и *6* и двух подвижных плит *4* и *5*, приводимых в движение от двух гидроцилиндров *1* и *7*. Неподвижные плиты стянуты расположенными по их диагоналям колоннами *3*. Эти колонны служат направляющими для подвижных плит.

Симметричное перемещение плит относительно оси заготовки и раздувающего ниппеля OO' обеспечивается синхронизатором. Корпус *11* синхронизатора крепится к основанию механизма или к середине нижней колонны. В корпусе укреплена ось, на которую подвижно надета шестерня *9*. В зацеплении с шестерней находятся зубчатые рейки *8* и *10*, каждая из которых укреплена на своей подвижной плите механизма смыкания. Благодаря такому кинематическому сочленению подвижных плит перемещение какой-либо из них вызывает точно такое же встречно направленное перемещение другой.

Пример двухпозиционного механизма смыкания с приводом от одного пневмоцилиндра *8* показан на рис. 6.17. Две неподвижные плиты *14* стянуты двумя диагонально расположенными колоннами *7*. Эти колонны служат также направляющими для трех основных подвижных плит *3*, *6*, *11* и одной вспомогательной подвижной плиты *15*. Механизм расположен под двухручьевой головкой с попеременно работающими ручьями *4* и *5*.

На плитах *3* и *11* укреплена одна пара полуформ — A и A', с другой стороны плиты *11* и на плите *6* укреплен другой комплект полуформ — $Б$ и $Б'$. В то время как полуформы A и A' открыты, полуформы $Б$ и $Б'$ закрыты и наоборот.

Механизм работает следующим образом. При смыкании полуформ $Б$ и $Б'$ шток *9* пневмоцилиндра *8* перемещает плиту *6* влево. Плита *6* связана двумя штангами *10* с плитой *3*, так что она также движется влево с той же скоростью, размыкая полуформы A и A'. Чтобы смыкание $Б$ и $Б'$ и размыкание A и A'



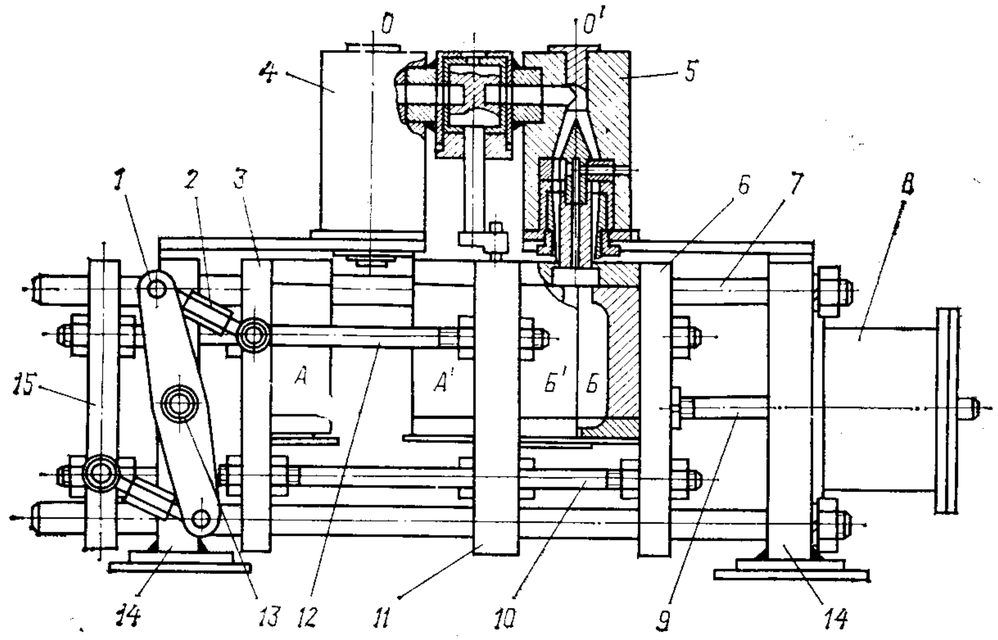


Рис. 6.17. Двухпозиционный механизм смыкания форм с приводом от одного пневмоцилиндра:

1 — шатун; *2* — серьга; *3, 6, 11, 15* — подвижные плиты; *4, 5* — ручьи двухручьевой головки; *7* — колонны; *8* — пневмоцилиндр; *9* — шток пневмоцилиндра; *10, 12* — штанги; *13* — ось; *14* — неподвижные плиты.

было симметричным относительно осей *O* и *O'*, необходимо, чтобы средняя подвижная плита *11* перемещалась вправо с той же скоростью. Это обеспечивается спаренным шатунным механизмом, ось которого *13* укреплена на неподвижной плите *14*. Плита *3*, перемещаясь влево, посредством серьги *2* поворачивает шатун *1* против часовой стрелки, и нижний конец шатуна, уходя вправо, тянет за собой вспомогательную плиту *15*, которая соединена с ним такой же серьгой. Плита *15* соединена парой штанг *12* со средней плитой *11* и поэтому толкает ее вправо. Плита *11*, перемещаясь, одновременно осуществляет перепуск расплава из правого ручья головки в левый ручей.

Смыкание и запирание полуформ одним механизмом у машин больших типоразмеров оказывается нецелесообразным: слишком различны по величине усилие, затрачиваемое на перемещение форм, и усилие их запирания. По этой причине механизмы описанных конструкций выполняют лишь функцию смыкания, а запирание выполняют самостоятельные механизмы. Пример последних приведен на рис. 6.18. Четыре идентичных механизма размещены по углам полуформ *2*. После их смыкания отверстия в серьгах *3* совмещаются с отверстиями

Рис. 6.16. Однопозиционный механизм смыкания форм с гидравлическим приводом:

1, 7 — гидроцилиндры; *2, 6* — неподвижные плиты; *3* — колонна; *4, 5* — подвижные плиты; *8, 10* — зубчатые рейки; *9* — шестерня; *11* — корпус синхронизатора.

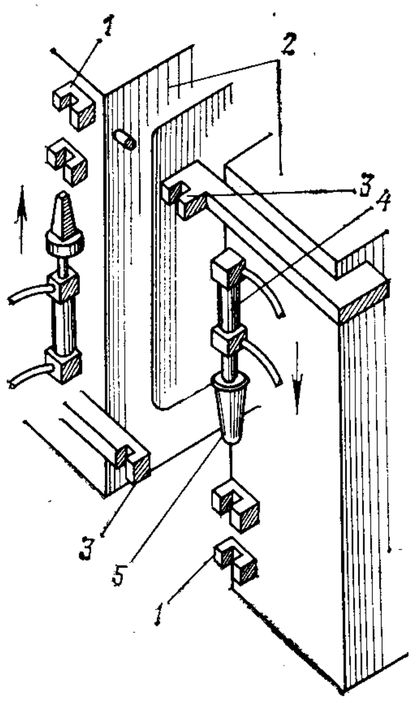


Рис. 6.18. Механизм запирания крупногабаритных форм:
1 — проушины; *2* — полуформы; *3* — серьги; *4* — пневмоцилиндр; *5* — клин.

проушин *1*, и клинья *5* вводятся пневмоцилиндрами *4* в совмещенные отверстия, запирая полуформы друг относительно друга.

Механизм смыкания машин для производства малых изделий часто выполняют с «книжным» типом смыкания полуформ (рис. 6.19). Преимущество их в том, что пространство между разомкнутыми полуформами максимально открыто для обслуживания (ввода заготовки, съема изделия): направляющие колонны этому не мешают, как это имеет место в описанных выше конструкциях.

Траверса *6* укреплена на станине или вращающемся столе агрегата (см., например, рис. 6.6) винтом *5*. Вокруг осей *2* траверсы могут вращаться навстречу друг другу кронштейны *1*, на которых смонтированы полуформы. Кронштейны приводятся во вращение складывающимися рычагами *3*, а те в свою очередь приводятся гидро- или пневмоцилиндром (на рисунке не показан), перемещающим шарнир *4* в направлении, указанном стрелками.

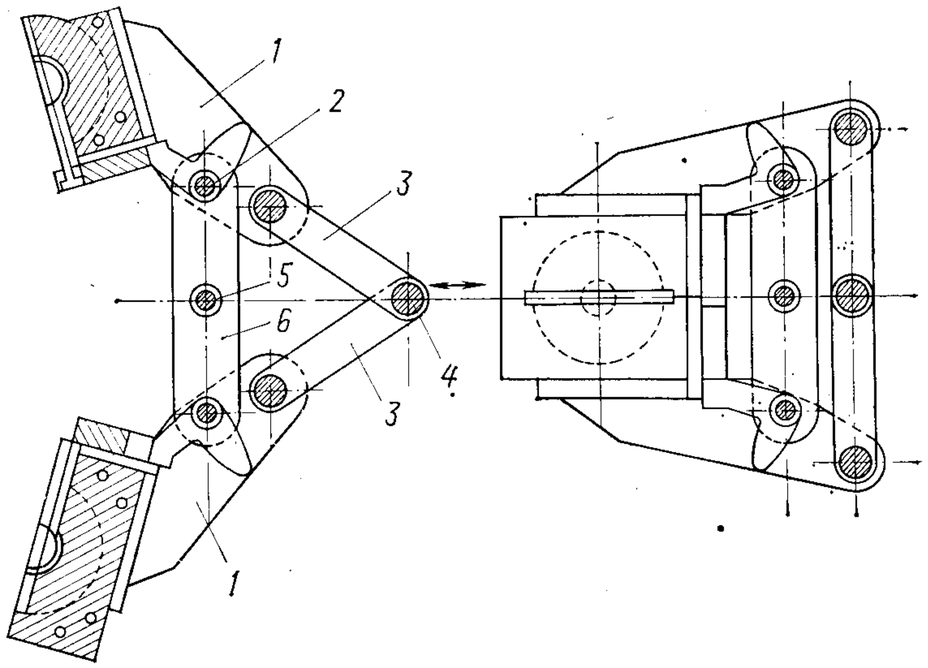


Рис. 6.19. Механизм смыкания «книжного» типа:
1 — кронштейны; *2* — ось; *3* — рычаги; *4* — шарнир; *5* — винт; *6* — траверса.

ГЛАВА 7

МАШИНЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ПНЕВМОВАКУУМНЫМ ФОРМОВАНИЕМ

7.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА ФОРМОВАНИЯ

Формование состоит из трех стадий: 1) нагрев листа или пленки термопласта до температуры, лежащей в температурном диапазоне высокоэластического состояния материала; 2) создание разности давлений воздуха в пространствах, примыкающих к противоположным сторонам разогретого листа, под действием этой разности лист деформируется, облегая формообразующую поверхность холодной формы; 3) выдержка отформованного листа в контакте с холодной формой с целью охлаждения материала до температуры, лежащей ниже температуры перехода в твердое состояние (температуры стеклования или кристаллизации).

Пневмовакуумное формование является одним из старейших методов изготовления изделий из пластических масс. Оно применяется в тех случаях, когда необходимо получить изделия с отношением линейных размеров к толщине стенки больше 150—200, т. е. тонкостенные изделия. В настоящее время этим методом изготавливается преимущественно тара и упаковка изделий и продуктов. В качестве сырья используются различные

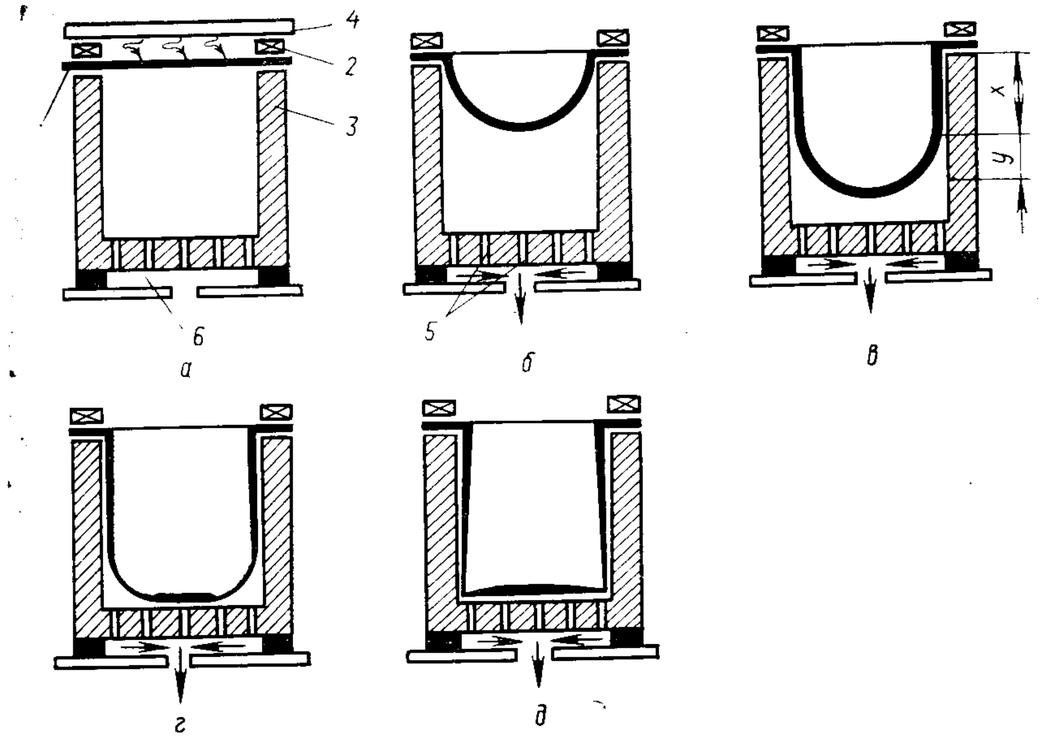


Рис. 7.1. Стадии негативного вакуумформования (*а—д* — стадии процесса):
1 — лист; *2* — рама; *3* — форма; *4* — нагреватель; *5* — вентиляционные каналы; *6* — дренажная полость.

термопласты в виде листов толщиной от 1 до 10 мм или пленок.

Рассмотрим, как реализуются отмеченные стадии метода на примере одной из его разновидностей (рис. 7.1). На первой стадии (рис. 7.1, *а*) лист *1* рамой *2* герметично поджимается к торцевой поверхности формы *3*, и над листом размещается нагреватель *4*. Происходит нагрев листа.

На второй стадии (рис. 7.1, *б*, *в*, *г*) нагреватель отводится, и из полости формы через вентиляционные каналы *5* отсасывается воздух. В полости создается разрежение, и лист, находясь в высокоэластическом состоянии, под воздействием разности атмосферного (над листом) и остаточного (в полости) давлений начинает втягиваться в полость, облегая холодную формообразующую поверхность.

На третьей стадии (рис. 7.1, *д*) отформованный лист, контактируя с формой, охлаждается. В высокоэластическом состоянии развившиеся в материале деформации обратимы, поэтому во избежание искажения приобретенной листом конфигурации на него должно оказываться давление вплоть до полного его отвердевания. По этой причине вакуум в дренажной полости *6* поддерживается вплоть до конца третьей стадии.

7.2. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ФОРМОВАНИИ

При пневмовакуумном формовании происходят три следующих основных процесса: нагрев листа, деформирование его, охлаждение изделия.

Нагрев листа для поддержания высокой производительности машины должен быть осуществлен за минимально возможное время. Качество прогрева оценивается неоднородностью распределения температуры по площади листа и по его толщине к концу стадии нагрева. При неоднородности нагрева по площади листа, превышающей 3—5 К, деформативность его оказывается столь неравномерной, что при последующем формовании приводит к неодинаковой вытяжке в различных местах изделия, образованию складок и морщин. Неоднородность температуры по толщине листа, измеряемая разностью температур обогреваемой и нейтральной поверхностей листа, не должна превышать диапазона оптимальных температур формования. Эти диапазоны, установленные на практике для различных материалов, приведены ниже:

Материал	Оптимальные температуры формования, К
Полистирол ударопрочный	408—450
Сополимер стирола и акрилонитрила	494—505
Поливинилхлорид непластифицированный	408—453
Сополимер винилхлорида с винилацетатом	397—433
Полиэтилен низкой плотности	394—421
Полипропилен	422—475
Полиэтилентерефталат	450—477

Минимальная температура листа (температура необогреваемой поверхности) не должна быть меньше нижнего предела указанного диапазона.

В машинах для пневмовакуумного формования используются три метода обогрева листа, различающиеся по способу подвода тепла к его поверхности: радиационный, конвективный и контактный. От обогреваемой поверхности в массу листа тепло распространяется путем теплопроводности.

При радиационном обогреве лист размещается на расстоянии 50—200 мм от нагретого до высокой температуры нагревателя. Тепло передается лучеиспусканием преимущественно в инфракрасной части спектра излучения. Лучистый тепловой поток $q_л$, направленный от нагревателя к единице поверхности листа, в соответствии с уравнением Стефана — Больцмана имеет следующее выражение:

$$q_л = \sigma\varepsilon (T_н^4 - T_п^4) \qquad (7.1)$$

где σ — постоянная; ε — степень черноты излучающего тела (для большинства нагревателей она равна 0,8—0,9); $T_н$ и $T_п$ — температуры излучающей поверхности нагревателя и поглощающей поверхности листа соответственно.

Максимально возможная температура нагревателя зависит от его конструкции, значения ее приведены в разд. 7.5.1. Температура полимера $T_п$ в процессе прогрева изменяется от комнатной до требуемой для формования. Однако при расчетах по формуле (7.1) ее можно с некоторым занижением мощности $q_л$ считать постоянной и равной конечному значению.

При конвективном обогреве лист принудительно омывается теплоносителем (чаще всего — горячим воздухом). Тепловой поток от теплоносителя к единице поверхности листа $q_к$ записывается следующим образом:

$$q_к = \alpha (T_в - T_п) \qquad (7.2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; $T_в$ — температура воздуха.

Для случая вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи определяется из следующего критериального уравнения:

$$Nu = 0{,}664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \qquad (7.3)$$

где $Nu = \alpha h/\lambda$ — критерий Нуссельта (h — линейный размер листа, λ — коэффициент теплопроводности воздуха); $Re = vH\rho/\eta$ — критерий Рейнольдса (v — скорость воздуха, H — высота зазора между листом и стенкой камеры, в которой циркулирует воздух, ρ — плотность воздуха, η — вязкость воздуха); $Pr = c\eta/\lambda$ — критерий Прандтля (c — удельная теплоемкость воздуха).

При контактном обогреве лист укладывают на горячую металлическую плиту, прижимая к ней. Если бы прижатие было идеальным, без микрозазоров, то температуры листа и плиты мгновенно уравнивались бы. Однако это практически невозможно, вследствие чего в месте контакта возникает локальное тепловое сопротивление, величину которого предсказать трудно.

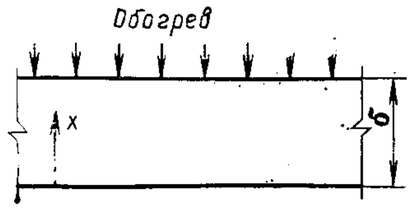


Рис. 7.2. К расчету времени прогрева листа.

Изменение температуры тела в направлении x его толщины δ (рис. 7.2) описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial t} = a_{\text{п}} \frac{\partial^2 T_{\text{п}}}{\partial x^2} \tag{7.4}$$

(где t — время, $a_{\text{п}}$ — коэффициент температуропроводности полимера) при следующих граничных условиях:

$$1)\ T_{\text{п}}\Big|_{t=0} = T_0; \qquad 2)\ \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0; \tag{7.5}$$

$$3\text{а})\ \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial x}\Big|_{x=\delta} = q_{\text{л}}; \qquad 3\text{б})\ \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial x}\Big|_{x=\delta} = q_{\text{к}}; \qquad 3\text{в})\ T_{\text{п}}\Big|_{x=\delta} \approx T_{\text{м}}$$

здесь T_0 — начальная температура листа; $T_{\text{м}}$ — температура греющей плиты; $\lambda_{\text{п}}$ — теплопроводность полимера.

Второе граничное условие отвечает отсутствию теплообмена на нейтральной поверхности листа. Условия 3а, 3б и 3в относятся к лучистому, конвективному и контактному обогреву соответственно.

Приближенное решение уравнения (7.4) с граничными условиями (7.5)—1, 2 и 3б, описывающее изменение температуры $T_{\text{п}}$ по толщине листа x и во времени t, имеет вид

$$\theta(x, t) = \frac{4 \sin k}{2k + \sin 2k} \exp\left(-\frac{k^2}{\delta^2} a_{\text{п}} t\right) \cos\left(k \frac{x}{\delta}\right) \tag{7.6}$$

Здесь

$$\theta(x, t) = [T_{\text{п}}(x, t) - T_{\text{в}}]/(T_0 - T_{\text{в}})$$

а k — первый корень следующего трансцендентного уравнения

$$k \operatorname{tg} k = \delta\alpha/\lambda_{\text{п}} \tag{7.6а}$$

Вычисление k по этому уравнению целесообразно выполнять на ЭВМ.

При расчете циклограммы вакуумформовочной машины и ее производительности возникает необходимость определения времени разогрева листа $t_{\text{р}}$. При обдуве горячим воздухом его можно найти по уравнению (7.6) следующим образом. Приняв толщину листа δ, а также зная $\lambda_{\text{п}}$ и рассчитав α, задаются температурой воздуха $T_{\text{в}}$, на 5—10 К большей, чем верхний предел температурного интервала, приведенного на с. 326. Далее определяют время $t_{\text{р}}$, в течение которого температура нейтральной поверхности ($x=0$) достигнет нижнего предела этого интервала. Для этого в (7.6) вводят значение $T_{\text{п}}$, равное нижнему пределу, x принимают равным нулю и вычисляют $t=t_{\text{р}}$. После этого можно оценить по (7.6), какой за время $t_{\text{р}}$ станет температура обогреваемой поверхности листа ($x=\delta$). Если она превысит верхний предел оптимального интервала, то следует принять меньшее значение $T_{\text{в}}$ и расчеты повторить. Если же она оказывается намного ниже верхнего предела, то с целью ускорения прогрева можно задаться несколько большей $T_{\text{в}}$ и также повторить расчет. Эту циклическую расчетную процедуру определения времени $t_{\text{р}}$ при оптимальной температуре воздуха целесообразно выполнять на ЭВМ.

При контактном обогреве локальное тепловое сопротивление в месте контакта намного меньше, чем при обдуве воздухом, поэтому в (7.6а) коэффициент теплоотдачи α можно приближенно принять равным бесконечности. Корень при этом принимает значение $\pi/4$. Под $T_{\text{в}}$ в выражении для θ следует понимать температуру греющей плиты $T_{\text{м}}$. Порядок расчетов по (7.6) в остальном аналогичен описанному выше.

Приближенное решение уравнения (7.4) для радиационного (лучистого) обогрева имеет вид

$$T(x, t) = T_0 + [q_{\text{л}}/(2\lambda_{\text{п}}\delta)]\,(x^2 + 2a_{\text{п}}t - \delta^2/3) \tag{7.7}$$

Порядок расчета времени разогрева $t_{\text{р}}$ и допустимой температуры нагревателей $T_{\text{н}}$ при этом способе обогрева следующий. Задавшись максимальной температурой $T_{\text{н}}$ в соответствии с рекомендациями разд. 7.5.1 и минимально допустимой температурой нейтральной поверхности (см. с. 326) по формуле (7.1) вычисляют $q_{\text{л}}$, а затем по (7.7) — $t_{\text{р}}$. Проверяют достигнутое за время $t_{\text{р}}$ значение температуры обогреваемой поверхности $T_{\text{п}}$, принимая в (7.7) $x=\delta$, и, если это значение больше допустимого (см. с. 326), то задаются новой, меньшей температурой нагревателей $T_{\text{н}}$.

Вторым процессом является деформирование листа, которое сводится к его двухосному растяжению (вытяжке). Проследим на примере (рис. 7.1), как протекает этот процесс. На первом этапе (рис. 7.1, *б*) заготовка листа втягивается в полость формы, не касаясь ее стенок. Площадь свободной поверхности заготовки растет, а объем остается постоянным. За счет этого толщина листа уменьшается, оставаясь, однако, одинаковой по всей поверхности.

Как только заготовка коснулась холодной стенки формы на некоторой длине (например, x на рис. 7.1, *в*), на образовавшейся поверхности контакта в заготовке появился тонкий слой отвердевшего материала. Этот слой препятствует дальнейшей вытяжке участка заготовки на длине x.

Последующей вытяжке подвергается лишь часть заготовки со свободной поверхностью, и новый участок контакта с формой образуется уже при новой, меньшей толщине листа. Таким образом, чем позже точка поверхности листа вступит в контакт

с формой, тем тоньше будет изделие в области этой точки. Получающийся при этом характер разнотолщинности изделия ясен из рис. 7.2.

Очевидно, что разнотолщинность изделия — это недостаток метода формования. Причина недостатка — последовательный, неодновременный вход в контакт с формой различных участков формуемой заготовки. Разработано несколько приемов, направленных на обеспечение максимально возможного деформирования заготовки вне контакта ее с формой и последующего практически одновременного ввода всех ее участков в контакт. Каждому приему (или их сочетанию) соответствуют своя разновидность метода формования и конструктивные особенности машины. Эти разновидности описаны в разд. 7.3.

Третьим процессом является охлаждение отформованного изделия за счет контакта с холодной формой. Уравнение (7.4) справедливо и в данном случае. Граничные условия его следующие:

$$\text{а) } T_{\text{п}}\Big|_{t=0} = \widetilde{T}_0; \qquad \text{б) } \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial x}\Big|_{x=\delta_{\text{и}}} = 0; \qquad \text{в) } T_{\text{п}}\Big|_{x=0} = T_{\text{ф}} \quad (7.8)$$

здесь поверхность с координатой $x=0$ контактирует с формой; поверхность с координатой $x=\delta_{\text{и}}$ обращена внутрь изделия; $T_{\text{ф}}$ — температура формы; $\widetilde{T}_0$ — средняя по толщине листа температура в начале стадии охлаждения.

Величину $\widetilde{T}_0$ можно считать приблизительно равной среднеарифметическому значению температур обогреваемой и нейтральной поверхностей в конце стадии нагрева листа. Толщина изделия $\delta_{\text{и}}$, как отмечалось, переменна. Наиболее медленно охлаждаются самые толстые части изделия. Их толщина практически равна толщине листа δ. Поэтому при расчете времени охлаждения следует принимать $\delta_{\text{и}}=\delta$.

Граничные условия (7.8) подобны условиям (7.5) для контактного нагрева. По этой причине решение уравнения (7.4) в виде $T_{\text{п}}(t, x)$ также аналогично для данного случая.

Охлаждение изделия в форме необходимо вести до тех пор, пока среднеинтегральная по толщине стенки температура не станет равной температуре стеклования полимера T_g. Формула для $\widetilde{T}(t)$, полученная интегрированием по координате x выражения (7.6) для $T_{\text{п}}(t, x)$, для случая контактного теплообмена имеет следующий вид:

$$\widetilde{\theta} = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\,\frac{at}{\delta^2}\right); \qquad \widetilde{\theta} = \frac{\widetilde{T}(t) - T_{\text{ф}}}{\widetilde{T}_0 - T_{\text{ф}}} \qquad (7.9)$$

Вводя в (7.9) вместо переменной $\widetilde{T}(t)$ конкретное ее значение T_g, получаем формулу для расчета времени охлаждения изделия в форме $t_{\text{о}}$.

Стадия нагрева листа может быть совмещена во времени с операцией извлечения изделия, изготовленного в предыдущем цикле, так что при соответствующей конструкции машины длительность нагрева не влияет на время цикла работы машины и, следовательно, на ее производительность. Время же охлаждения непосредственно влияет на длительность цикла. В связи с этим охлаждение толстостенных изделий интенсифицируют, обдувая их свободную поверхность воздухом или распыляя на нее воду.

7.3. РАЗНОВИДНОСТИ МЕТОДА ПНЕВМОВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ

7.3.1. Свободное, негативное и позитивное формование

Свободное формование отличается от рассмотренной на рис. 7.1 разновидности тем, что процесс ограничивается позицией «*б*». По достижении требуемой степени вытяжки откачивание воздуха из полости формы прекращается, дренажный канал *7* закрывается, и изделие охлаждается, контактируя с атмосферным воздухом. Свободным формованием изготавливают, например, колпаки осветителей и фонари зданий.

Негативное формование (см. рис. 7.1) получило свое название в связи с тем, что формообразующая поверхность формы (матрицы), будучи вогнутой, является как бы негативом, слепком с изделия.

Позитивное формование (рис. 7.3) отличается от негативного тем, что формообразующая поверхность формы (пуансона) выпуклая. Позитивное формование применяют, если требуется, чтобы утолщенная стенка изделия получалась в донной части его, или когда необходимо, чтобы точно по форме была воспроизведена внутренняя поверхность изделия. Сравнивая рис. 7.1 и 7.3, видим, что существенный недостаток позитивного метода — большие отходы листа.

7.3.2. Формование с механической вытяжкой

Схемы формования с механической вытяжкой показаны на рис. 7.4.

Негативное формование с предварительной механической вытяжкой (рис. 7.4, *а*) происходит следующим образом. После нагрева листа (поз. *I*) нагреватель *1* отводится в сторону, а вытяжной пуансон *2* опускается, вытягивая лист (поз *II*).

Размеры пуансона на 10—20% меньше соответствующих размеров формообразующей поверхности матрицы *3*, так что основная вытяжка листа выполняется пуансоном. При вытяжке пуансоном лист не касается холодной матрицы, поэтому толщи-

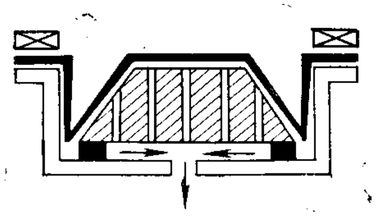


Рис. 7.3. Схема позитивного вакуумформования.

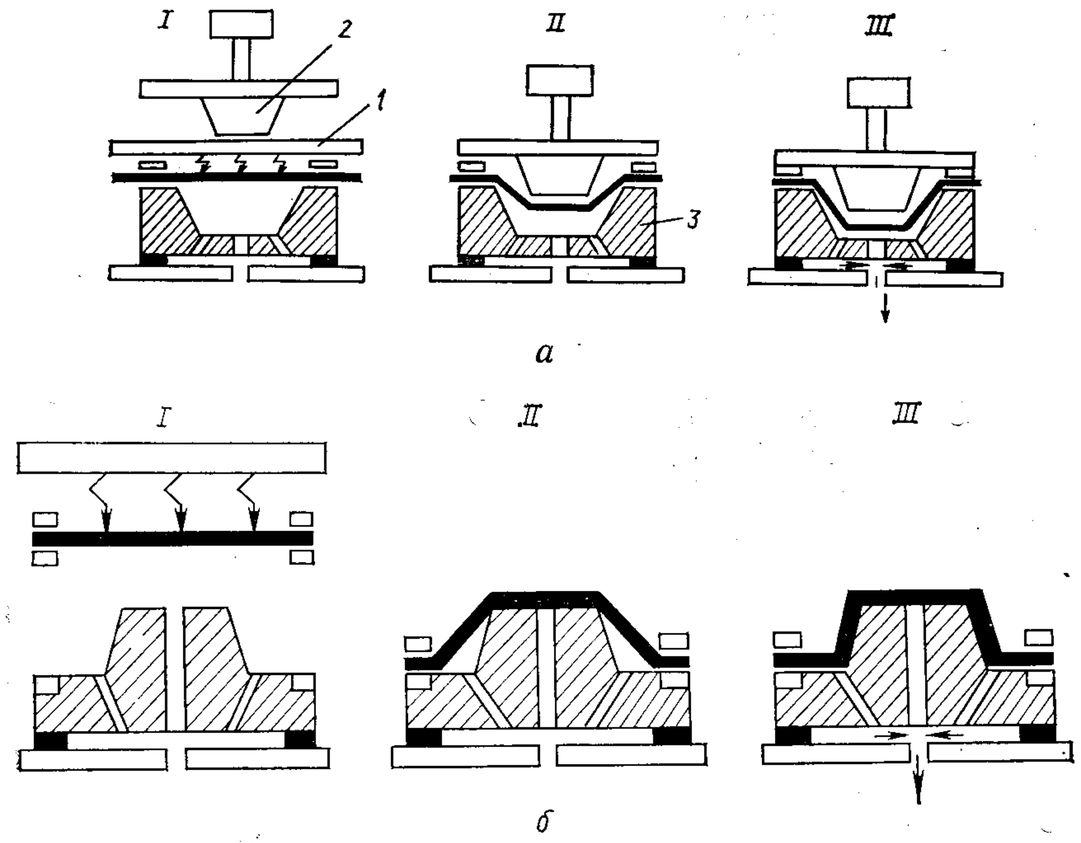


Рис. 7.4. Негативное (*а*) и позитивное (*б*) формование с механической вытяжкой.

на стенок изделия получается примерно одинаковой. При окончательной вытяжке созданием в полости вакуума (поз. *III*) лист практически одновременно касается стенок полости всей своей поверхностью.

При механической вытяжке (поз. *II*) часть листа контактирует с пуансоном. Чтобы, несмотря на контакт, эта часть листа беспрепятственно вытягивалась, необходимы, во-первых, минимально возможный коэффициент трения между листом и пуансоном, во-вторых, минимальное охлаждение листа при контакте с ним. В связи с этим вытягивающий пуансон часто делают обогреваемым или облицовывают его материалами с низкой теплопроводностью и малым коэффициентом трения (фторопластом, велюром, бархатом).

Позитивное формование с механической вытяжкой показано на рис. 7.4, *б*. Стадии формования на поз. *I, II, III* те же, что и на рис. 7.4, *а*. Преимущество перед вариантом, показанным на рис. 7.4, *а*, состоит в том, что один и тот же пуансон используется как для вытяжки, так и для окончательного формования, т. е. конструкция машины может быть более простой. Недостаток состоит в том, что при вытяжке материал контактирует с холодным пуансоном, имеющим высокую теплопроводность. Чтобы устранить этот контакт, можно на стадии вытяжки через отверстия в пуансоне для откачивания воздуха подавать его

под давлением. Он создает прослойку (воздушную подушку) между пуансоном и листом, не препятствуя вытяжке последнего.

7.3.3. Формование с пневматической вытяжкой

Предварительную вытяжку листа можно осуществлять не механическим воздействием пуансона, а путем создания разности давлений с противоположных сторон листа. Стадии негативного и позитивного формования с предварительной пневматической вытяжкой показаны на рис. 7.5, *а* и *б* соответственно. При негативном вакуумформовании после прогрева (поз. *I*) в формующую полость подается воздух, и лист выдувается в полусферу (поз. *II*). Затем в полости создается разрежение, и раздутый лист, вывернувшись наизнанку, облегает формообразующую поверхность (поз. *III*).

При позитивном вакуумформовании поз. *I* и *II* такие же, однако вытяжка происходит за счет разрежения, создаваемого под листом в пневмовакуумной камере. После вытяжки формующий пуансон опускается и разрежение снимается (поз. *III*). Не успевшая еще охладиться заготовка, стремясь под действием внутренних упругих сил вернуться в первоначальное положение, облегает пуансон и затвердевает, охлаждаясь. Для лучшего облегания заготовкой пуансона лист поджимается к нему за счет сжатого воздуха, подаваемого в камеру, или за счет разрежения, создаваемого в каналах пуансона.

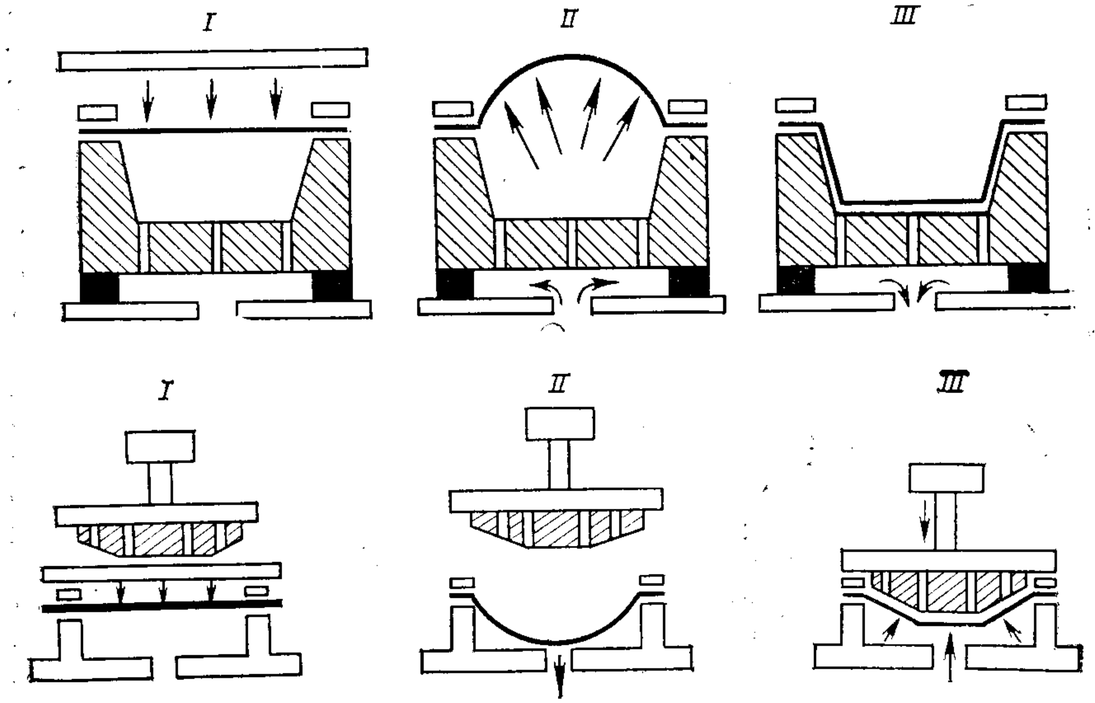


Рис. 7.5. Негативное (*а*) и позитивное (*б*) формование с пневматической вытяжкой.

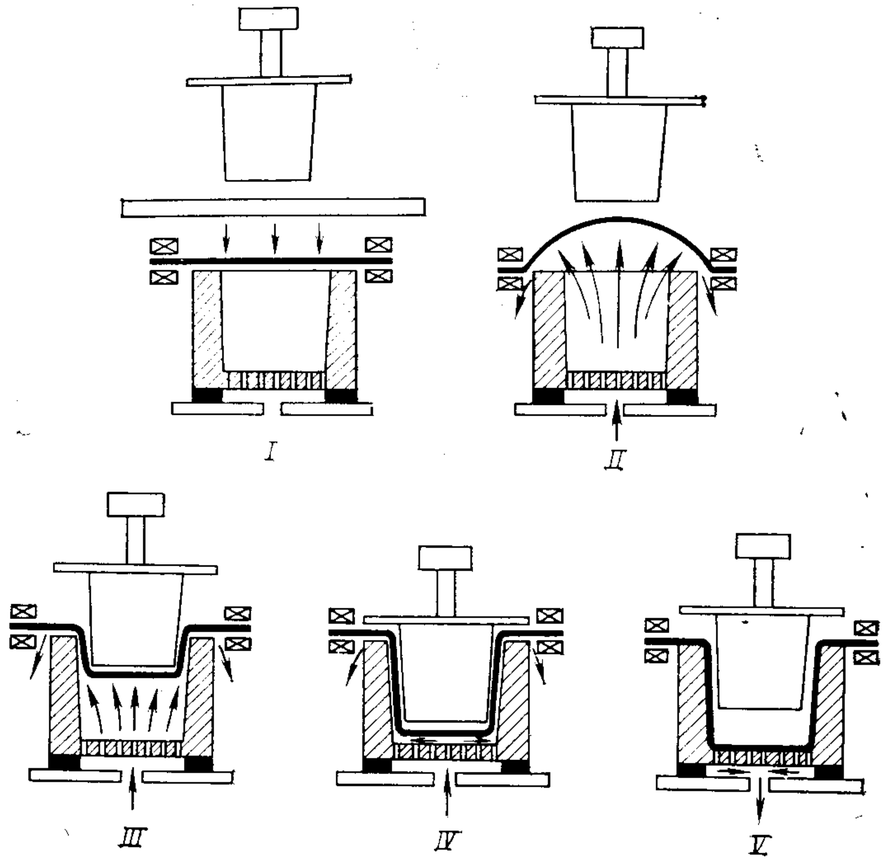


Рис. 7.6. Негативное формование с пневмомеханической вытяжкой.

При пневматической вытяжке толщина вытянутого листа получается более однородной, чем при механической, так как отсутствует контакт с вытяжным пуансоном, стесняющий процесс вытяжки.

7.3.4. Формование с пневмомеханической вытяжкой

Схема негативного формования с комбинированной вытяжкой приведена на рис. 7.6. Нагрев и раздув заготовки (поз. *I*, *II*) осуществляется так же, как показано на рис. 7.5, *а*, с той разницей, что на завершающем этапе раздува листа рама с ним приподнимается для свободного выхода воздуха из формы. Сразу вслед за подъемом рамы вытягивающий пуансон опускается (поз. *III*, *IV*), выворачивая лист наизнанку и вытягивая его дополнительно до размеров, близких к окончательным. Воздух в это время продолжает поступать в дренажные каналы матрицы, создавая воздушный слой между ее поверхностью и листом и тем самым предотвращая их контакт. На завершающей стадии (поз. *V*) полость матрицы вакуумируется, и лист облегает поверхность матрицы.

При формовании с пневмомеханической вытяжкой получают изделия с минимальной разнотолщинностью.

7.3.5. Пневматическое формование

Все рассмотренные в разд. 7.3.1—7.3.4 разновидности относятся к типу вакуумного формования. Очевидно, что при этом методе максимальная разность давлений, создаваемых с противоположных сторон листа, не может превышать 0,1 МПа. При толщине листа, большей 3—5 мм, эта разность давлений недостаточна для того, чтобы быстро сформовать изделие; формование оказывается столь длительным, что лист успевает значительно охладиться и потерять деформативность. Изделия получаются недостаточно хорошего качества.

Для толстых листов используют тип пневматического формования. Разность давлений при этом создается не за счет разрежения со стороны листа, обращенной к форме, а за счет избыточного давления, развиваемого с противоположной стороны листа. При этом может быть достигнута разность давлений от 0,15 до 2,5 МПа.

При пневмоформовании могут быть реализованы все разновидности метода, описанные в предыдущих разделах, однако конструкция рабочих органов машины становится более сложной: появляется герметично прижимаемая к листу пневмокамера, в которой должно создаваться избыточное давление.

7.4. КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПНЕВМОВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ

Машины для пневмовакуумного формования классифицируют по следующим признакам: 1) способ создания формующего давления; 2) число позиций; 3) исходный вид перерабатываемого материала; 4) назначение машины.

По первому признаку различают машины для вакуумного, пневматического формования и машины, на которых можно осуществлять оба этих вида формования. Каждый из этих типов машин может иметь механизмы для предварительной механической вытяжки.

По второму признаку машины подразделяются на одно-, двух-, трех- и многопозиционные. У однопозиционных машин все технологические операции (нагрев, вытяжка, формование) осуществляются при одном неизменном положении заготовки, т. е. на одной позиции. Во время выполнения какой-либо одной операции механизмы, предназначенные для выполнения других операций, простаивают. Чтобы интенсифицировать их работу и увеличить производительность машины, ее выполняют многопозиционной: рабочие органы для различных операций располагают в разных местах (позициях), а заготовку листа после завершения очередной операции транспортируют к рабочим органам, выполняющим следующую операцию. При этом в машине одновременно обрабатывается несколько заготовок (их число равно числу позиций).

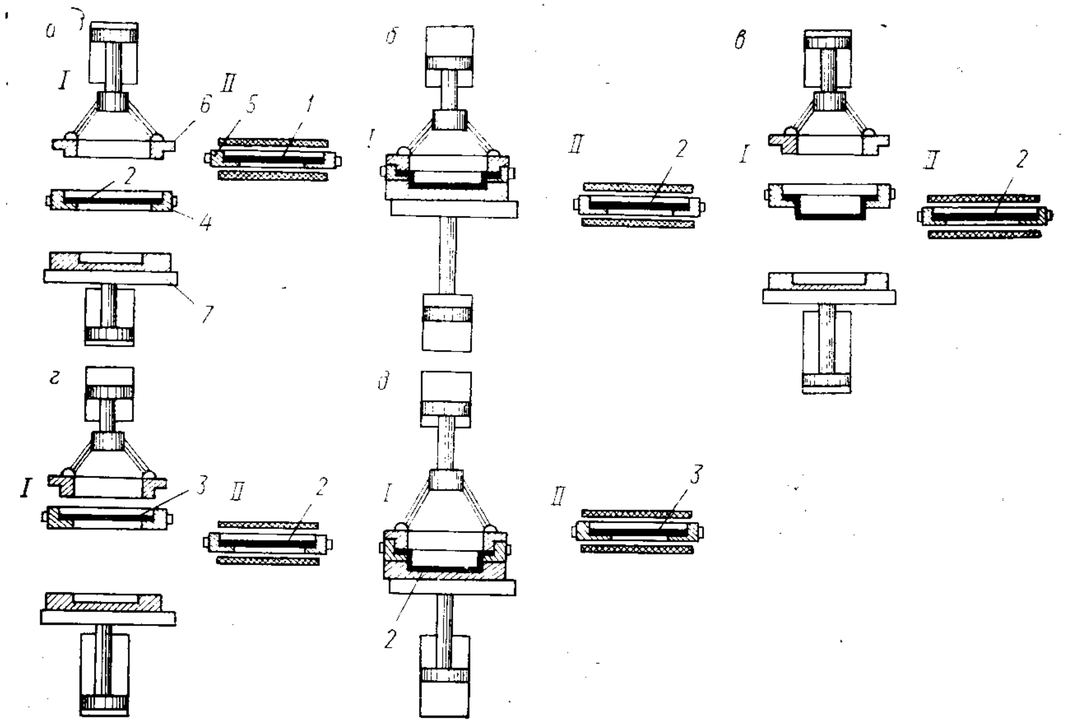


Рис. 7.7. Двухпозиционная вакуумформовочная машина. Пояснения в тексте.

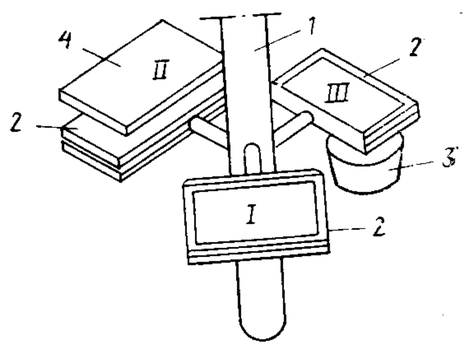
По третьему признаку выделяют машины, перерабатывающие рулонный листовой материал и материал в виде отдельных заготовок.

По четвертому признаку машины делятся на универсальные и специализированные.

На рис. 7.7 показана схема двухпозиционной вакуумформовочной машины. В поз. *I* выполняются закрепление листовой заготовки *1*, *2* или *3* в прижимных подвижных рамах *4* или *5*, формование изделия и съем готового изделия. В поз. *II* происходит разогрев заготовки. Цикл работы этой машины состоит из следующих операций. Заготовка *1* вместе с рамой *5* находится в поз. *II* на нагреве, а заготовка *2* в раме *4* — в поз. *I* (рис. 7.7, *а*); прижимное устройство *6* поднято, подъемный стол *7* с формой опущен. После встречного перемещения рам на имеющихся на них роликах по направляющим (на схеме не показаны) заготовка *2* становится в поз. *II* на нагрев, а заготовка *1*, перешедшая в поз. *I*, формуется под вакуумом при поднятом столе с формой и опущенном прижимном устройстве (рис. 7.7, *б*). В поз. *II* заготовка *2* нагревается, а в поз. *I* изделие из заготовки *1* охлаждается.

По завершении отмеченных операций стол с формой опускается, прижимное устройство поднимается и изделие извлекают из формы (рис. 7.7, *в*). Новую заготовку *3* укладывают на место отформованной заготовки *1* и заканчивают разогрев заготовки *2* (рис. 7.7, *г*). После этого рамы с заготовками меняются местами: заготовка *2* оказывается в поз. *I*, готовой для начала

Рис. 7.8. Трехпозиционная вакуумформовочная машина ротационного типа. Пояснения в тексте.



формования, а заготовка *3* поступает в поз. *II* на нагрев (рис. 7.7, *д*).

В данной конструкции машины заготовки не имеют непроизводительных выстоев ни на одной позиции, если суммарное время операций на поз. *I* приблизительно равно времени нагрева заготовки. Однако при формовании толстых листов (более 10 мм) время нагрева оказывается намного бóльшим. В связи с этим часто выпускают машины с двумя позициями нагрева (предварительный и окончательный нагрев).

Если же формуются изделия из тонкого листа или пленки, то время прогрева оказывается намного меньше суммы времен охлаждения изделия и перезарядки рамы, причем времена охлаждения изделия и перезарядки рамы становятся примерно равными. В этом случае оказывается целесообразным формование и охлаждение изделия выполнять в одной позиции, а перезарядку рамы — в другой. Схема такой машины с ротационным типом механизма перемещения рам с заготовками показана на рис. 7.8. В поз. *I* заготовка зажимается в раму *2* и вал *1* с тремя рамами *2* поворачивается на 120°; при этом зажатая заготовка попадает в поз. *II*, располагаясь под нагревателем *4*. После прогрева и очередного поворота на 120° заготовка оказывается в поз. *III* над формой *3*. Последняя, поднявшись, прижимается к заготовке, происходит формование и охлаждение изделия. После охлаждения осуществляется опускание формы и поворот вала *1* на 120° в обратном направлении. Отформованное и зажатое в раме изделие попадает в поз. *II*, где оно снимается, а в раму вставляется новая заготовка. Такие маши-

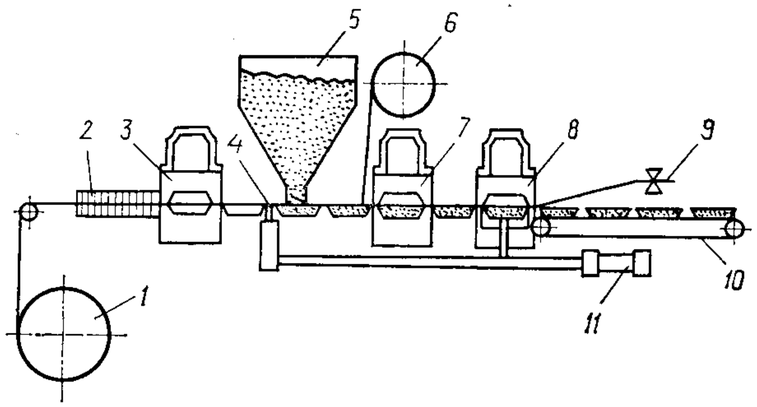


Рис. 7.9. Схема многопозиционной машины ленточного типа для формования и заполнения мелкой тары с пульсирующей протяжкой листа:

1 — рулон листа; *2* — позиция нагрева; *3* — позиция формования; *4* — захват; *5* — бункер; *6* — рулон пленки; *7* — машина для термоимпульсной сварки; *8* — вырубное устройство; *9* — приемное устройство для отходов; *10* — транспортер; *11* — пневмоцилиндр.

ны могут выполняться и четырехпозиционными (с двумя позициями нагрева).

Для формования изделий из рулонных листов или пленок применяются многопозиционные машины ленточного типа с непрерывной или пульсирующей протяжкой сматываемого с рулона материала. Схема машины с пульсирующей протяжкой показана на рис. 7.9. Сматываемый с рулона *1* лист поступает в позицию нагрева *2*, где прогревается часть листа требуемой длины. После прогрева лист смещается на эту длину, и прогретый участок поступает в позицию формования *3*. Протяжка листа на заданную длину осуществляется с помощью механизма, имеющего захват *4*, приводимый в движение пневмоцилиндром *11*. На следующей за механизмом протяжки (третьей) позиции осуществляется заполнение отформованной тары сыпучим продуктом из бункера *5*.

На четвертой позиции происходит закупоривание заполненной тары: сматываемая с рулона *6* пленка прижимается к листу с отформованными и заполненными ячейками тары и приваривается по периметру каждой из них машиной *7* для термоимпульсной сварки. На пятой позиции вырубное устройство *8* отделяет закупоренные ячейки и подает их на транспортер *10*, а лист с просечками от ячеек приемным устройством *9* отводится в отходы.

Машины с непрерывной подачей материала (рис. 7.10) имеют узел формования роторного типа. Сматываемый с рулона *1* лист (или пленка) валком *2* прижимается к ротору *6* с множеством выполненных на его поверхности матриц *5*. Охватывая непрерывно вращающийся ротор, лист попадает под нагреватель *3*. На интервале между нагревателем *3* и охлаждающим устройством *4* полости матриц сообщаются с вакуумом; здесь в листе формуются ячейки тары. С ротора лист с отформованными ячейками поступает на позиции заполнения *7*, закупорки *8* и вырубки *9*. Отходы листа поступают в приемное устройство *10*.

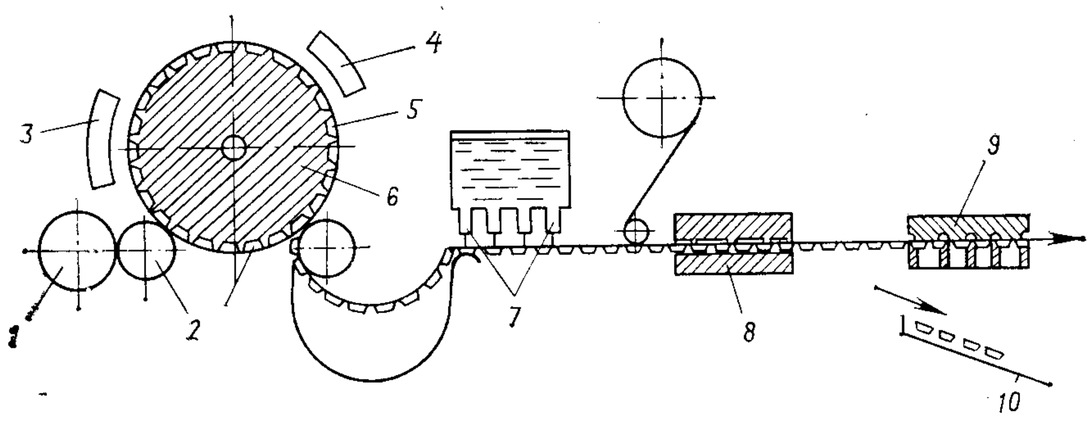


Рис. 7.10. Схема многопозиционной машины ленточного типа с непрерывной подачей листа:

1 — рулон листа; *2* — прижимной валок; *3* — нагреватель; *4* — охлаждающее устройство; *5* — матрица; *6* — ротор; *7* — заполняющее устройство; *8* — закупоривающее устройство; *9* — вырубное устройство; *10* — приемное устройство для отходов.

7.5. КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ МАШИН ДЛЯ ПНЕВМОВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ

7.5.1. Нагреватели

При радиационном способе нагрева в качестве нагревателей сопротивления используют нихромовую проволоку или ленту. Открытые (т. е. непосредственно сообщающиеся с атмосферным воздухом) нагреватели в настоящее время практически не применяются по двум причинам. Во-первых, нагрев проволоки вызывает ее удлинение и провисание, что нарушает плоскостность греющей поверхности, образованной множеством натянутых лент (или проволок). Во-вторых, контакт с кислородом воздуха, омывающего нагретую проволоку при естественной конвекции, вызывает ее интенсивное окисление. Скорость окисления зависит от температуры, поэтому достаточная долговечность открытых нагревателей может быть обеспечена только при относительно низких температурах (около 673 К). Мощность излучения и скорость нагрева листа при этом невелики.

Конструкции радиационных электронагревателей различаются по способу заделки нихромовой проволоки.

В первом типе нагревателей используются керамические цилиндрические стержни, имеющие от двух до шести продольных отверстий, в которые вставляется проволока в виде прутка или спирали. Отверстия по торцам стержня сообщаются с атмосферой, так что контакт с кислородом воздуха не исключен, однако скорость поступления кислорода воздуха к поверхности проволоки в десятки раз меньше, чем в открытых нагревателях. Температура проволоки в этих нагревателях может достигать 973 К. Одна из важных функций керамики — опорная: проволока не провисает, и расстояние между излучающей и обогреваемой поверхностями поддерживается постоянным.

Во втором типе нагревателей в качестве рабочих элементов применяют так называемые трубчатые электронагреватели (ТЭНы). ТЭН представляет собой трубку, выполненную из жаропрочного металла. Внутрь трубки введена нихромовая спираль. Пространство между спиралью и внутренними стенками трубки заполнено сильно уплотненным порошковым материалом с высокой теплопроводностью и хорошими электроизоляционными свойствами, например оксидом магния. Контакт проволоки с кислородом воздуха здесь практически исключен.

Недостатки этих двух типов нагревателей следующие. Большая масса ограждающих проволоку конструкций требует дополнительного количества тепла на ее прогрев до рабочей температуры. Время прогрева составляет 10—15 мин. После выклю-

чения нагреватели еще длительное время излучают запасенное ими тепло. В связи с этим такие нагреватели целесообразно эксплуатировать в стационарном режиме без выключения в каждом цикле. Такой режим приемлем для многопозиционных машин (см., например, рис. 7.8), где практически в течение всего времени работы нагревателя под ним находится листовая заготовка. Если же их используют в однопозиционных машинах (см., например, рис. 7.6), то, отводя от заготовки, нагреватель располагают над листом материала с низкой теплопроводностью и хорошей отражающей способностью (например, фольгированного асбеста). Это предотвращает непроизводительное излучение тепла в атмосферу во время выстоя нагревателя.

Другой недостаток керамических нагревателей и ТЭНов состоит в том, что у них излучает тепло не поверхность нихромовой проволоки, а наружная поверхность керамики или ТЭНа. Температура излучающей поверхности значительно ниже, чем у проволоки, поэтому мощность излучения [см. формулу (7.1)] гораздо меньше, чем у открытой проволоки. Этих недостатков лишены нагреватели с кварцевым изолятором.

В третьем типе нагревателей нихромовая проволока введена в тонкую прозрачную трубку из кварцевого стекла, заполненную инертным газом. Эти нагреватели малоинерционны, поэтому могут работать в циклическом режиме. Контакт с кислородом полностью отсутствует, и температура проволоки может быть доведена до 2473 К. Излучает тепло непосредственно горячая проволока, так что мощность излучения этих нагревателей значительно больше, чем у нагревателей типов, описанных выше.

Независимо от типа нагреватели располагаются в одной плоскости и монтируются на раме. Со стороны, противоположной обогреваемому листу, и с боков набранный таким образом пакет нагревателей экранируется отражателем из тонколистового полированного алюминия. Отражатель возвращает попадающее на него излучение нагревателей на лист полимера. Снаружи отражатель покрыт теплоизоляцией в виде листового асбеста и защитным кожухом.

Нагреватели могут быть классифицированы также по степени подвижности относительно обслуживаемой ими зоны. Различают *подвижные, стационарные* и *полустационарные* нагреватели.

Подвижными нагревателями оснащаются однопозиционные машины (рис. 7.1, 7.3—7.6). В каждом цикле нагреватель подводится к листу только на время его прогрева, а затем отводится, чтобы не мешать работе подвижных рабочих органов машины и не греть лист на стадии охлаждения его в форме.

В многопозиционных машинах (типа показанных на рис. 7.7, 7.8) нагреватели установлены стационарно. В машинах, перерабатывающих рулонные материалы (рис. 7.9 и 7.10), используются нагреватели полустационарного типа. При работе машины он неподвижен, однако во время непредвиденных остановок машины его нужно отводить от листа, так как длительный прогрев даже от выключенного (но медленно остывающего) нагревателя может вызвать термодеструкцию материала и загазованность производственного помещения.

7.5.2. Прижимные устройства

К прижимным устройствам предъявляются следующие требования: возможность зажима листов разных размеров — для универсальных машин (это требование обеспечивается комплектацией машины набором зажимных рам разных размеров); возможность зажима листов разной толщины; быстрота зажима листа и съема изделия; равномерность и герметичность зажима по периметру листа.

По принципу действия все устройства можно разделить на два типа: *рамные* и *лепестковые.*

Устройство рамного типа состоит из двух рам (верхней и нижней), между которыми закрепляется лист. Как правило, нижняя часть рамы при ее раскрытии остается неподвижной. Часто (см., например, схему, показанную на рис. 7.5) нижняя часть рамы скреплена или выполнена заодно с формовочной камерой. Верхняя часть рамы при закладке заготовки и съеме изделия или откидывается на шарнирах (зажимное устройство раскрывается как книга) или приподнимается над нижней частью рамы, оставаясь параллельной ей.

В машинах малых размеров при закрытии рамы обе ее части стягиваются расположенными равномерно по периметру механизмами с ручным приводом. Подъем и опускание верхней части рамы при «книжном» разъеме ее также осуществляются вручную; для облегчения этой операции подвижная часть оснащается противовесом.

В больших машинах в зависимости от габаритов рамы применяют цилиндры, обеспечивающие раскрытие рамы и зажим заготовки, или цилиндры двух видов, один из которых обеспечивает раскрытие рамы, а другой — зажим заготовки. Первый вариант применяется для более легких машин (рис. 7.11). Два качающихся цилиндра *1* закреплены на формовочной камере *2*,

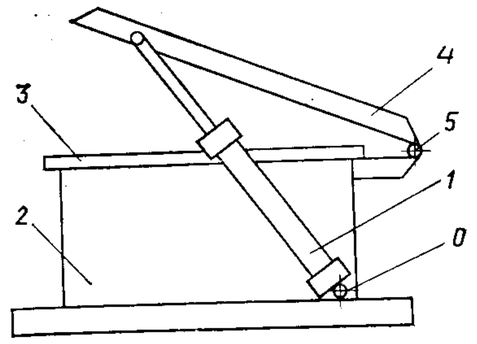


Рис. 7.11. Зажимная рама с едиными цилиндрами для ее подъема и зажима заготовки:

1 — цилиндр; *2* — формовочная камера; *3* — нижняя часть рамы; *4* — верхняя часть рамы; *5* — шарнир.

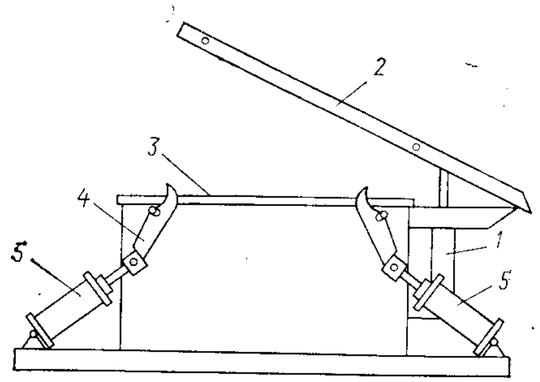


Рис. 7.12. Зажимная рама с различными цилиндрами для ее подъема и зажима заготовки:
1 — цилиндр для подъема рамы; *2* — верхняя часть рамы; *3* — нижняя часть рамы; *4* — захват; *5* — цилиндры для зажима заготовки.

с которой неподвижно связана нижняя часть рамы *3*. Верхняя часть рамы *4* поворачивается относительно шарнира *5*.

Пример конструкции зажимной рамы с раздельными цилиндрами зажима заготовки и подъема рамы приведен на рис. 7.12. Подъем верхней части рамы *2* обеспечивается цилиндром *1*, а зажим заготовки — четырьмя цилиндрами *5* с помощью захватов *4*, закрепленных на нижней части рамы *3*.

На машинах с пневмо- или гидроприводом зажимных рам во избежание непроизвольного закрытия их во время работы формовщика в зоне рамы применяют страхующие подставки, вводимые под верхнюю часть рамы, когда она находится в раскрытом состоянии. Подставки перемещаются при помощи пневмо- или гидропривода.

Более прогрессивными, хотя и менее распространенными, являются *лепестковые зажимные устройства*. Они легче, удобнее и безопаснее в работе. Схема такого устройства приведена на рис. 7.13. Нижняя часть зажима *7*, представляющая собой собственно зажимную раму, неподвижна, а его верхняя часть *4* может поворачиваться на 90° относительно оси шарнира *3*. В раскрытом положении в качающийся цилиндр *1* давление не подается, и натяжением пружины *2* зажим откинут. После установки листовой заготовки в цилиндр *1* подается рабочее давление, и под действием его закрепляется заготовка *6*. Устройства расположены равномерно по периметру всей рамы таким образом, что широкие рабочие части (лепестки) *5* зажимов *4* практически контактируют друг с другом.

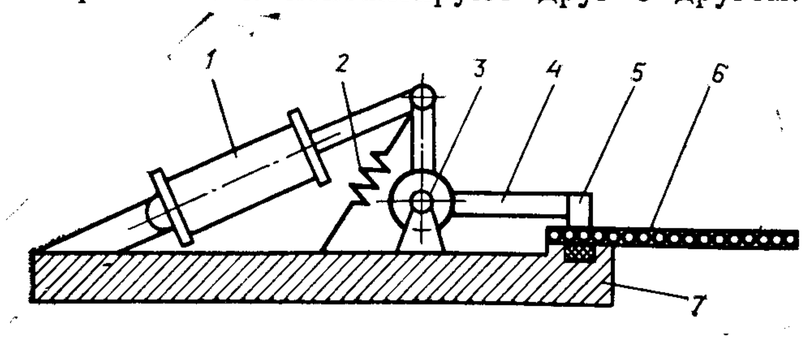


Рис. 7.13. Схема зажима лепесткового типа:
1 — цилиндр; *2* — пружина; *3* — шарнир; *4* — верхняя часть зажима; *5* — рабочая часть зажима; *6* — заготовка; *7* — нижняя часть зажима.

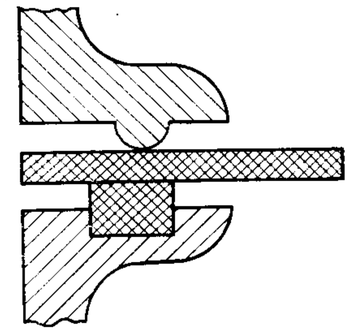


Рис. 7.14. Крепление листа в зажимном устройстве.

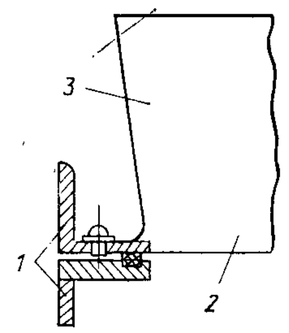


Рис. 7.15. Зажимное устройство с отражателем:
1 — зажимное устройство; *2* — заготовка; *3* — отражатель.

Как в рамных, так и в лепестковых зажимных устройствах лист термопласта чаще всего закрепляется между резиновой вставкой, изготовляемой из пористой теплостойкой резины, и металлическим выступом. Резиновая вставка укрепляется обычно на нижней части рамы, а металлический выступ выполнен на верхней части или на лепестке (рис. 7.14). Выступ не должен быть острым, чтобы не порвать тонкую пленку или не расколоть лист хрупкого термопласта.

Для увеличения к. п. д. нагревателя иногда на верхней части зажимных рам устанавливают отражатели, существенно уменьшающие потери тепла в окружающую среду через боковой зазор между нагревателем и листом и повышающие однородность прогрева листа. Пример установки отражателя показан на рис. 7.15. На верхней части зажимного устройства *1*, удерживающего заготовку *2*, укреплен отражатель *3*.

В зависимости от разновидности способа формования и конструкции машины рама с зажимными устройствами может быть неподвижной или подвижной относительно корпуса машины. Примеры, поясняющие необходимость в подвижной или неподвижной конструкции рамы, даны на рис. 7.1, 7.3—7.10.

7.5.3. Пневмовакуумные системы

Большинство машин имеет не только системы для создания вакуума, но и системы для создания избыточного давления. Как избыточное давление, так и вакуум используются непосредственно для формования изделия из листа. Кроме того, сжатый воздух применяется в пневмоцилиндрах привода механизмов, для обдува находящегося в форме изделия с целью интенсификации его охлаждения и для облегчения извлечения изделия из формы. В последнем случае при съеме изделия сжатый воздух подают в дренажные отверстия в матрице или пуансоне, через которые он отсасывается на стадии формования. Сжатый воздух, оказываясь между формой и охлажденным из-

делием, отслаивает их друг от друга и тем самым облегчает съем изделия.

Для откачивания воздуха из формы или формующей камеры и создания в них вакуума используют так называемые насосы низкого вакуума, т. е. насосы, которые создают при практически нулевой производительности минимальное остаточное давление около 10^{-4} МПа. К насосам этого типа относят поршневые (одно- и двухступенчатые) и ротационные пластинчатые насосы.

Машины могут иметь собственный воздушный компрессор или потреблять сжатый воздух из цеховой магистрали. Как правило, формовочные машины потребляют сжатый воздух с давлением 0,4—2,5 МПа. Для создания этого давления используются преимущественно поршневые компрессоры.

Время формования листа, в течение которого из формы отводится воздух, не превышает 1—3 с, что составляет не более 1—2% общего времени цикла формования изделия. При формовании крупногабаритных изделий за это время из формы отводится до 50 дм³ воздуха. Если бы откачивание воздуха из формы осуществлялось непосредственно вакуум-насосом, то потребовался бы насос большой производительности, по габаритам близкий к самой машине. Вместе с тем этот насос простаивал бы в течение 98—99% времени цикла. Во избежание столь нерационального использования вакуум-насоса в вакуумную систему вводят ресивер.

Насос может откачивать из ресивера воздух в течение всего цикла (т. е. практически непрерывно), а в момент начала формования листа ресивер соединяется с формой, и воздух из нее истекает в ресивер под воздействием развившегося в нем вакуума. Производительность и металлоемкость насоса в этом случае могут быть в 50—100 раз меньше, чем при непосредственном соединении его с формой.

Необходимая производительность насоса Q в системе с ресивером может быть рассчитана как

$$Q = V_\Phi k / t_\text{ц} \qquad (7.10)$$

где V_Φ — объем полости формы или формующей камеры, из которой требуется откачивать воздух; $t_\text{ц}$ — время цикла формования; k — коэффициент запаса, равный 1,1—1,3.

Чем меньше остаточное давление в форме p_Φ в процессе формования, тем больше движущая сила этого процесса Δp, равная разности между атмосферным давлением p_0 и величиной p_Φ

$$\Delta p = p_0 - p_\Phi \qquad (7.11)$$

и тем, следовательно, быстрее формуется изделие. Далее, чем больше значение Δp в конце стадии формования, т. е. когда формуемый лист уже контактирует практически со всей поверхностью матрицы или пуансона, тем лучше прижим листа к форме и воспроизведение листом всех деталей ее конфигурации. Таким образом, наилучший режим формования обеспечивается, если движущая сила процесса формования Δp имеет максимально возможное значение и это значение остается постоянным в течение всей стадии формования. Однако, как показано ниже, этот режим может быть соблюден лишь приближенно и при условии правильного выбора объема ресивера. Схема, поясняющая расчет необходимого объема ресивера, показана на рис. 7.16.

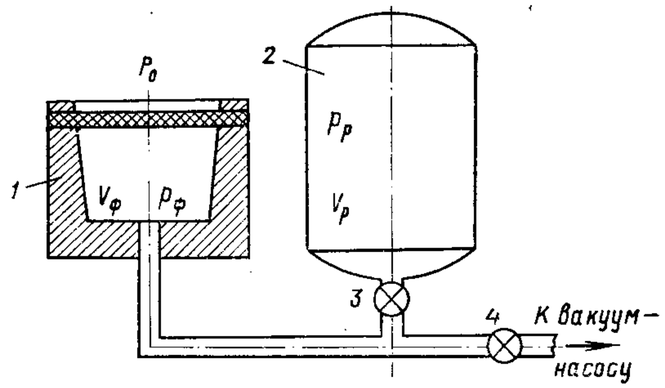


Рис. 7.16. К расчету объема ресивера:
1 — форма; *2* — ресивер; *3*, *4* — вентили.
Пояснения в тексте.

Условие постоянства массы воздуха в системе форма — ресивер в любой момент стадии формования может быть записано в виде

$$p_\Phi V_\Phi + p_\text{р} V_\text{р} = \text{const} \qquad (7.12)$$

где V_Φ и $V_\text{р}$, p_Φ и $p_\text{р}$ — объемы и давления воздуха в форме и ресивере соответственно.

Можно выделить три состояния системы форма — ресивер.

Состояние I. Перед формованием вакуум-насос развил в ресивере *2* остаточное давление $p_{\text{р}0}$ и отключился. Вентили *3* и *4*, соединяющие ресивер с насосом и формой *1*, закрыты. В полости формы, герметично закрытой листом, давление атмосферное.

Состояние II. Вентиль *3* открыт, и часть воздуха из формы практически мгновенно перетекла в ресивер; давление в форме и ресивере уравнялось и приняло значение $p_\text{н}$:

$$p_\Phi = p_\text{р} = p_\text{н} \qquad (7.13)$$

С этого момента начинается втягивание листа в полость формы под воздействием движущей силы $\Delta p_\text{н}$, равной

$$\Delta p_\text{н} = p_0 - p_\text{н} \qquad (7.14)$$

Следует заметить, что, так как часть воздуха из формы перетекла в ресивер, то давление в нем $p_\text{н}$ стало бóльшим, чем исходное $p_{\text{р}0}$ в состоянии I. По этой причине движущая сила формования $\Delta p_\text{н}$ оказывается меньше максимально возможного ее значения $\Delta p_\text{макс}$, равного

$$\Delta p_\text{макс} = p_0 - p_{\text{р}0} \qquad (7.15)$$

Состояние III. Атмосферное давление вдавило лист в форму, и весь воздух из нее перетек в ресивер, за счет чего дав-

ление в нем возросло по сравнению с состоянием II и приняло значение $p_к$. Давление в форме по-прежнему одинаково с давлением в ресивере и равно $p_к$. Так как $p_к > p_н$, то движущая сила процесса в конце стадии формования, равная

$$\Delta p_к = p_0 - p_к \tag{7.16}$$

оказывается меньше, чем в начале этой стадии.

Из рассмотренного ясно, что определенный выше наилучший режим формования строго не соблюдается. Условие достаточного приближения реального режима к наилучшему получим следующим образом. Запишем в соответствии с (7.12) условие равенства массы воздуха в системе в состояниях I и II:

$$p_0 V_ф + p_{р0} V_р = p_н V_ф + p_н V_р \tag{7.17}$$

Решение (7.17) относительно $p_н$ дает

$$p_н = p_0 V_ф/(V_ф + V_р) + p_{р0} V_р/(V_ф + V_р) \tag{7.18}$$

Вводя (7.18) в (7.14), получаем

$$\Delta p_н = p_0 [1 - 1/(1 + \varphi)] - p_{р0} (1/\varphi + 1)^{-1} \tag{7.19}$$

где $\varphi = V_р/V_ф$.

Аналогично, записав условие равенства массы воздуха для состояний I и III

$$p_0 V_ф + p_{р0} V_р = p_к V_р \tag{7.20}$$

и выполнив подобные же преобразования, находим

$$\Delta p_к = p_0 - p_к = p_0 (1 - 1/\varphi) - p_{р0} \tag{7.21}$$

Из выражений (7.19) и (7.21) видно, что величины $\Delta p_н$ и $\Delta p_к$ стремятся к своему максимально возможному, предпочтительному значению $\Delta p_{макс}$ (7.15) при устремлении к бесконечности отношения φ объема ресивера к объему формы. На рис. 7.17 показано, как изменяются с ростом объема ресивера движущие силы в начале $\Delta p_н$ и конце $\Delta p_к$ формования, а также их разность $\Delta p_н$—$\Delta p_к$. Видно, что уже при достижении этой разности, равной 6—8 МПа, движущая сила становится практически постоянной в течение стадии формования и приближается к своему значению, равному 0,1 МПа. В связи с этим объем ресивера пневмовакуумформо-

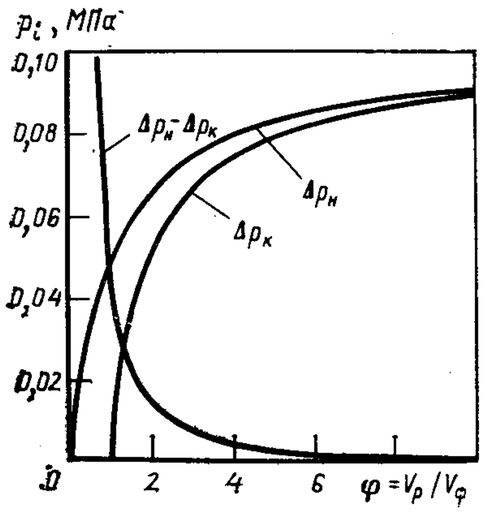


Рис. 7.17. Зависимость параметров режима формования от отношения φ объема ресивера к объему формы. Исходное давление в ресивере $p_{р0}$ принято равным нулю.

вочной машины не делают бóльшим, чем 6—8 объемов формующей камеры или форм, которые предполагают использовать на этой машине.

Ресиверы вакуумсистем представляют собой обычно сварные оболочки из листовой стали, состоящие из цилиндрической обечайки и эллиптических днищ. Ресиверы рассчитывают на устойчивость как сосуды, работающие под внешним давлением. Для упрочнения стенок ресиверов рекомендуется применять в них внутреннее оребрение. Вакуумные коммуникации внутри машины выполняют из бесшовных стальных труб, вакуумных резиновых шлангов и медных трубок.

7.5.4. Привод

Привод формовочных машин обеспечивает: перемещение рабочих органов (зажимных рам, пуансонов, матриц, вырубных устройств); создание ими необходимых рабочих усилий; перемещение рулонного материала.

В связи с наличием в машинах пневмосистем, обслуживающих выполнение технологических операций (предварительная вытяжка листа, прижатие его к формообразующей поверхности) наиболее распространены в качестве привода пневмоцилиндры.

Технологическое усилие Q_1 устройств, обеспечивающих предварительную механическую вытяжку формуемого листа, можно определить по формуле

$$Q_1 = S q_в \tag{7.22}$$

где S — площадь листа, на которую воздействует данное устройство; $q_в$ — давление предварительной механической вытяжки, равное $q_в = (1{,}5 \div 2)\Delta p$.

Технологическое усилие Q_2, создаваемое цилиндрами, запирающими зажимные устройства, рассчитывают по формуле

$$Q_2 = q П B/n \tag{7.23}$$

где q — давление зажима на лист, не превышающее предела текучести материала листа; П — периметр зажимаемой заготовки; B — ширина полоски контакта зажимающего уступа верхней части рамы с листом; n — число пневмоцилиндров.

Технологическое усилие вырубных устройств Q_3 может быть рассчитано как

$$Q_3 = \sigma_{ср} П_1 \delta \tag{7.24}$$

где $\sigma_{ср}$ — разрушающее напряжение при срезе материала листа; $П_1$ — периметр вырубаемого изделия; δ — толщина листа в месте вырубки.

В некоторых моделях формовочных машин возвратно-поступательное движение отдельных механизмов осуществляется с помощью пар винт — гайка.

Наиболее сложными являются приводы, обеспечивающие перемещение рам в многопозиционных машинах ротационного

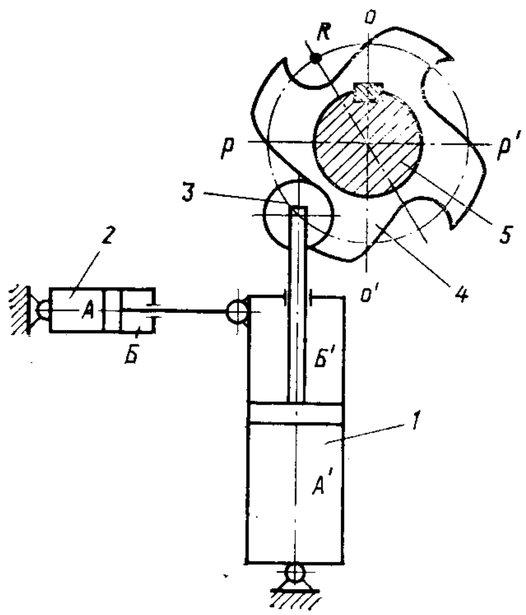


Рис. 7.18. Схема механизма поворота ротора двумя пневмоцилиндрами:
1, 2 — качающиеся пневмоцилиндры; *3* — ролик; *4* — ротор; *5* — вал ротора.

типа. Так как роторы этих машин обычно массивны и имеют большую инерцию, то для их точного останова используют фиксаторы, а у машин крупных типоразмеров и тормозные устройства.

Роторы приводятся во вращение электродвигателями, гидро- или пневмоцилиндрами. Передача вращения ротору от электродвигателя осуществляется с помощью зубчатых передач или мальтийских механизмов. В механизмах поворота с приводом от гидро- или пневмоцилиндра передающими устройствами могут быть пара шестерня — рейка, храповые механизмы.

Пример храпового механизма с двумя качающимися пневмоцилиндрами показан на рис. 7.18. Механизм показан в промежуточном положении во время операции поворота ротора *4*. В поршневую полость *А* цилиндра *2* и штоковую полость *Б′* цилиндра *1* подается воздух. Под воздействием усилий от этих цилиндров ролик *3* прижимается к впадине храпового колеса *4* и проворачивает его вместе с валом *5* ротора. Поворот прекращается, когда ось ролика пересекает осевую линию *oo′*. В этом положении происходит выстой. Перед новым поворотом воздух подается в полость *Б* цилиндра *2*, и ролик *3* вместе со штоком качающегося цилиндра *1* отводится влево, разобщаясь с храповым колесом. Затем воздух подается в полость *А′* цилиндра *1*, и ролик поднимается, становясь напротив следующей впадины храпового колеса, центр которой *R* совмещен с горизонтальной осью *pp′*. В полость *А* цилиндра *2* подается воздух, и ролик входит во впадину, прижимаясь к ней; механизм готов к очередному повороту. Поворот начинается, когда воздух подается в полость *Б′* цилиндра *1*.

Основным требованием к механизмам для периодической протяжки рулонного материала является высокая точность воспроизведения шага перемещения. Особенно жестко это требование для многопозиционных машин, осуществляющих заполнение, укупорку и вырубку отформованной тары, так как даже небольшая неточность в воспроизведении длины протяжки приводит к браку. Механизмы протяжки не должны деформировать ленту материала при ее перемещении.

Наиболее распространена протяжка пленки цепными транспортерами. На каждом звене двух цепей, расположенных параллельно краям ленты, имеется шип. Входя в контакт с цепями, лента по краям накалывается на шип и перемещается далее от позиции к позиции как одно целое вместе с цепями.

Возможно также использование для протяжки кулисно-рычажных механизмов различного типа.

ГЛАВА 8

МАШИНЫ ДЛЯ РОТАЦИОННОГО И ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМОВАНИЯ

8.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

Ротационное формование используется для получения крупногабаритных полых изделий различной формы из полимерных материалов. Заполненная порошкообразным или гранулированным материалом закрытая металлическая форма вращается вокруг двух и более пересекающихся осей. При этом происходит распределение сырьевого материала по внутренней поверхности полости формы, а одновременный нагрев формы способствует его расплавлению с образованием тонкого покрытия в виде оболочки. Фиксация формы и размеров получаемого полого изделия достигается охлаждением расплавленного материала (в случае переработки термопластов) или последующим нагревом (в случае переработки реактопластов).

Последовательность основных технологических операций при ротационном формовании термопластов показана на рис. 8.1. На стадии «*а*» происходит загрузка сырья *1* в холодную форму *2*, на стадиях «*б*» и «*в*» последовательно осуществляются на-

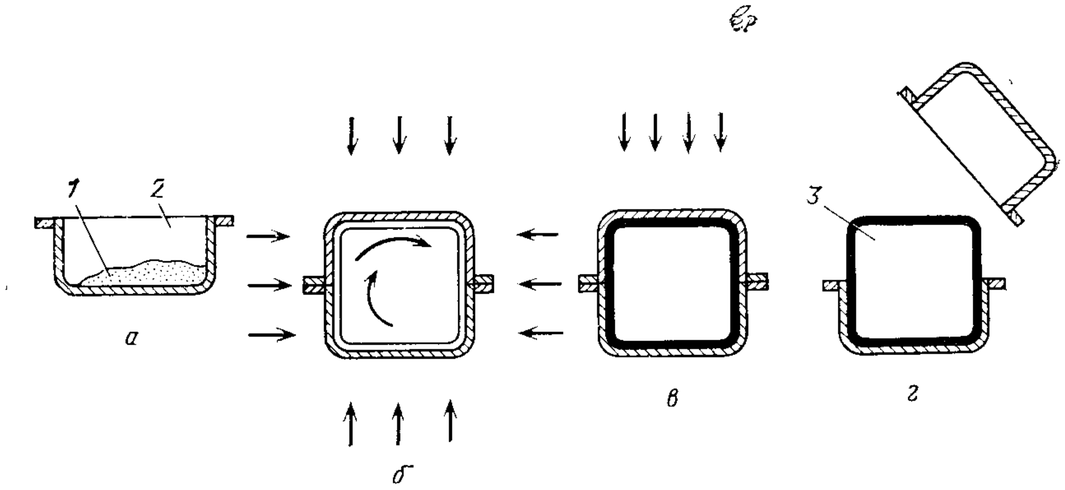


Рис. 8.1. Схема метода ротационного формования (*а—г* — стадии формования):
1 — сырье; *2* — форма; *3* — готовое изделие.

грев и охлаждение формы при одновременном ее вращении вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, на стадии «г» готовое изделие извлекается из формы.

Ввиду того, что вращение формы в данном методе происходит с небольшой частотой (до 50 об/мин), роль центробежных сил в формовании изделия невелика. Вращение формы необходимо только для того, чтобы осуществить равномерное распределение материала по ее стенкам в результате перемещения порошка или гранулята под действием силы тяжести. Это перемешение происходит по ряду наклонных поверхностей с изменяющимися в процессе формования углами наклона.

По мере нагрева формы нагревается и плавится высокодисперсный сыпучий материал, увеличивается сопротивление перемещению частиц порошка по внутренней поверхности формы, происходит их налипание на стенки формы. При переходе полимерного материала в вязкотекучее состояние он теряет свойства сыпучести и превращается в расплав. Вязкость расплава достаточно велика для того, чтобы предотвратить перемещение материала относительно стенки формы до окончания процесса формования.

Изменяемыми технологическими параметрами процесса ротационного формования являются: частоты вращения формы вокруг главной (горизонтальной) оси $N_{гл}$ и вокруг вторичной (вертикальной) оси $N_в$, соотношение частот вращения вокруг этих осей $M=N_{гл}/N_в$, температура нагрева формы $T_ф$ и время нагрева $t_н$, а также объемные характеристики сыпучего материала. Параметры $N_{гл}$, $N_в$ и M определяют траекторию движения частицы относительно внутренней поверхности полости формы. Протекание процесса расплавления материала зависит от теплофизических характеристик сырья, времени пребывания материала в вязкотекучем состоянии и параметров $T_ф$ и $t_н$.

Выбор параметров технологического процесса ротационного формования в настоящее время производится только экспериментальным путем. Установлено, что продолжительность цикла формования изделия в основном определяется временем $t_н$, которое зависит от толщины формуемого изделия и изменяется от 5—6 мин при толщине стенки изделия 1,5—2 мм до 8—9 мин при толщине стенки 4—5 мм. Параметр M изменяется в пределах 1,5—3,5, при этом значение M тем больше, чем больше конфигурация формуемых изделий отличается от шаровой или кубической.

Методом ротационного формования перерабатываются такие термопластичные материалы, как наполненный техническим углеродом полиэтилен, полиамиды и др. Этот метод нашел применение и при получении изделий из порошков реактопластов. К достоинствам метода относится простота изготовления полых изделий по сравнению с другими методами. При ротационном формовании легко достигается образование отверстий в стенке изделия и местное изменение толщины стенки за счет изменения теплопроводности стенки формы. При установке на стенке формы вкладышей из теплоизоляционного материала, например асбеста, возникает резкое уменьшение теплопроводности в зоне вкладыша, что приводит к невозможности плавления полимерного материала в данной зоне и к образованию отверстия в готовом изделии.

Процесс ротационного формования характеризуется практическим отсутствием отходов материала и затрат на дополнительную механическую обработку готовых изделий. Отформованные изделия имеют гладкую поверхность без сварных швов, снижающих прочность изделий. При этом наиболее прочными являются углы и кромки изделия, которые обладают наименьшей прочностью при раздувном и пневмовакуумном формовании.

К недостаткам метода следует отнести большую длительность технологического цикла изготовления изделий и трудоемкость извлечения полученного изделия из формы. В настоящее время метод ротационного формования используется для получения изделий объемом до 10 000 л с толщиной стенок 6—20 мм.

8.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

8.2.1. Основные виды оборудования для ротационного формования

По конструктивному признаку оборудование для ротационного формования подразделяется на одно-, трех- и четырехшпиндельные установки. Одношпиндельная установка (рис. 8.2) предназначена для опытных целей и использования в мелкосерийном производстве. Установка состоит из двух автономных приводных устройств *1* и *12*, служащих для вращения формы *7* вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Привод *1* через цепную передачу *2* передает вращение площадке *5* через вал *3* вокруг горизонтальной оси. Приводное устройство *12* вращает платформу *8* с укрепленной на ней формой *7* вокруг оси, пер-

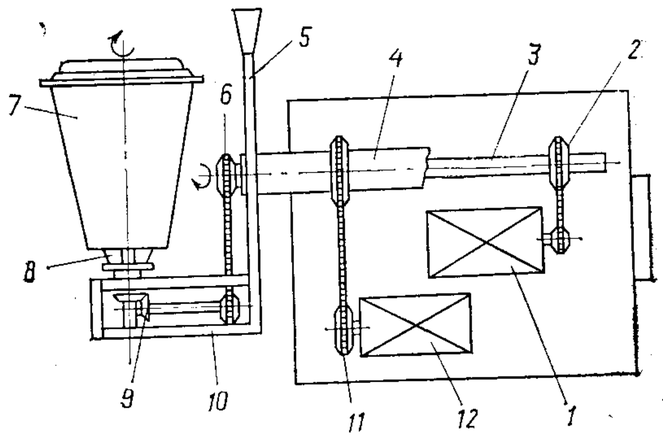


Рис. 8.2. Схема одношпиндельной установки для изготовления полых изделий методом ротационного формования:

1, 12 — приводы; *2, 6, 11* — цепные передачи; *3* — вал; *4* — полый вал; *5* — площадка; *7* — форма; *8* — платформа; *9* — коническая зубчатая передача; *10* — рама.

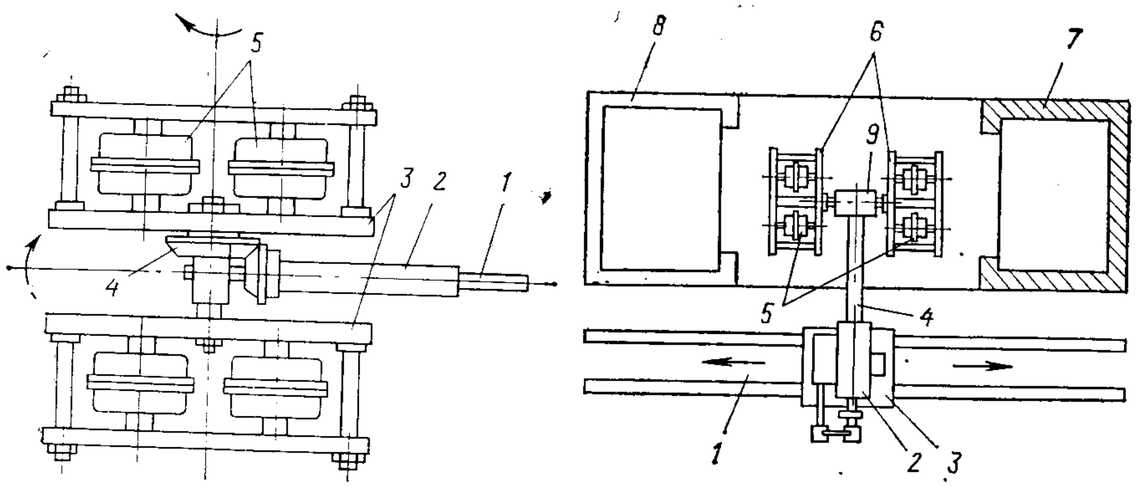


Рис. 8.3. Устройство для двухосного вращения форм:
1 — вал; *2* — полый вал; *3* — площадка с формами; *4* — коническая зубчатая передача; *5* — формы.

Рис. 8.4. Одношпиндельная установка, оснащенная камерами нагрева и охлаждения:
1 — рельсовый путь; *2, 9* — приводы; *3* — платформа; *4* — шпиндель; *5* — формы; *6* — площадки; *7* — нагревательная печь; *8* — охлаждающая камера.

пендикулярной оси вращения вала *3*, через цепную передачу *11*, полый вал *4*, цепную передачу *6*, коническую зубчатую передачу *9*. Данная конструкция устройства для двухосного вращения форм относится к устройствам для ротационного формования со смещенным расположением форм.

В промышленности нашли применение и подобные устройства с двухсторонним расположением форм (рис. 8.3). В этой конструкции вал *1* вращает площадку *3* с формами *5* в плоскости, перпендикулярной оси валов. Наружный вал *2* через систему конических шестерен *4* вращает формы в плоскости, параллельной оси валов. Такое устройство оснащается комплектом из двух, четырех, восьми и более форм. Форма одношпиндельной установки может нагреваться и охлаждаться с помощью теплоносителя, подаваемого в рубашку обогрева, или при попеременном перемещении формы в нагревательную печь и охлаждающую камеру.

На рис. 8.4 изображена схема одношпиндельной установки, перемещающейся по рельсовому пути. Шпиндель *4* и его привод *2* закреплены на общей платформе *3*, которая передвигается по рельсам *1* в нагревательную печь *7*, охлаждающую камеру *8* или расположенную между ними позицию загрузки сырья и выгрузки изделия. Площадки *6* с формами *5* вращаются приводами *2* и *9*, расположенными соответственно на подвижной платформе *3* и в головке шпинделя, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Трехшпиндельная установка для переработки термопластов (рис. 8.5) является агрегатом с замкнутым циклическим перемещением ротационных форм в горизонтальной плоскости. Три рабочих шпинделя *7* обслуживают попеременно три рабочие позиции: загрузки — выгрузки, формования (нагревания) и фиксации формы (охлаждения). Камера нагрева *1* представляет собой печь, в которой с помощью циркулирующего горячего воздуха производится нагрев форм. В камере охлаждения *2* форма охлаждается посредством разбрызгивания воды на поверхности формы. Поворотный стол *3* с платформами *4* фиксируется в рабочих положениях защелкой *5*. Механизм привода вращения шпинделей *7* расположен в шпиндельных коробках *6*. Установка защищена ограждением *8*. Операции загрузки сырья и выгрузки готовых изделий выполняются на рабочей площадке *9*.

В связи с тем, что производительность трехшпиндельной установки определяется продолжительностью стадии нагрева формы в камере, оказалось целесообразным помещать в эту камеру одновременно два или более шпинделей.

В четырехшпиндельном агрегате (рис. 8.6) в нагревательной тоннельной печи *8*, закрываемой заслонкой *6*, одновременно находятся два из четырех шпинделей *7*, перемещающихся вокруг главного приводного вала *3*. Рабочие площадки *2* с формами *1* вращаются вокруг продольной оси шпинделя и второй оси, расположенной перпендикулярно оси шпинделя. Охлаждение формы происходит в камере *5*, закрытой заслонкой *4*. Одновременное нагревание в камере *8* двух комплектов форм, расположенных на двух шпинделях, позволило увеличить про-

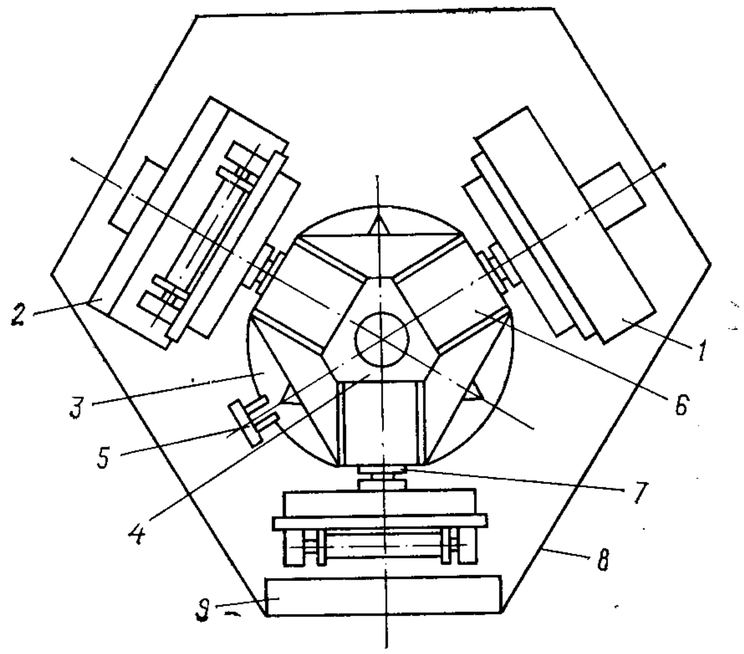


Рис. 8.5. Трехшпиндельная установка для ротационного формования:
1 — камера нагрева; *2* — камера охлаждения; *3* — поворотный стол; *4* — платформа; *5* — защелка; *6* — шпиндельная коробка; *7* — шпиндель; *8* — ограждение; *9* — рабочая площадка.

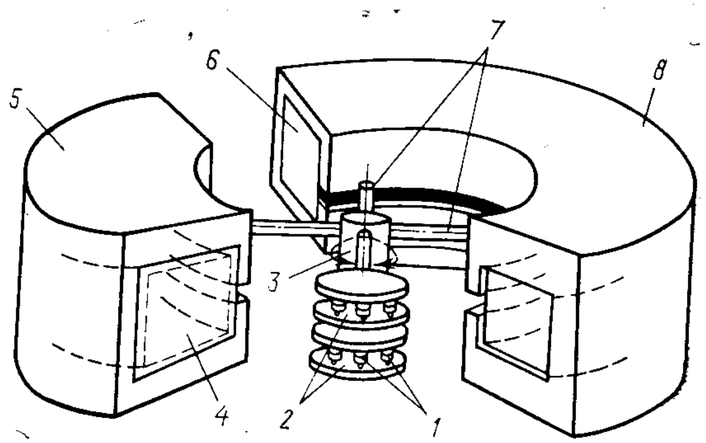


Рис. 8.6. Четырехшпиндельная установка для ротационного формования:
1 — формы; *2* — рабочие площадки; *3* — главный приводной вал; *4, 6* — заслонки; *5* — камера охлаждения; *7* — шпиндели; *8* — камера нагревания.

должительность нагрева без увеличения времени цикла изготовления изделия.

Одношпиндельные установки относятся к машинам периодического действия, трех-, четырех- и многошпиндельные установки являются машинами непрерывного действия.

Установки для ротационного формования могут быть классифицированы также по способу нагрева и охлаждения форм, способу крепления форм к шпинделям, конструкции форм, числу гнезд в формах и другим конструктивным особенностям.

8.2.2. Формы для ротационного формования и способы их термостатирования

Формы для ротационного формования обычно изготавливают из металла: отливок из алюминия, листов мягкой стали, гальванической меди и никеля. Ввиду того, что качество поверхности готового изделия определяется состоянием формующей поверхности, при изготовлении формы особое внимание уделяется устранению трещин и пор в верхнем слое металла формы, контактирующем с изделием. Алюминиевые формы изготавливаются литьем в гипсовые формы, что позволяет получить минимальную пористость отливки.

Формы из алюминия имеют обычно более одной плоскости разъема и характеризуются сложной конфигурацией формующей поверхности. Формы из листовых материалов, имеющие сварную конструкцию, предназначены для изготовления изделий простой конфигурации. Эти формы обычно имеют одну плоскость разъема и с целью повышения жесткости конструкции снабжаются упрочняющими элементами. Гальваническим способом получают неразъемные формы, используемые в производстве малогабаритных изделий из высокоэластичных материалов.

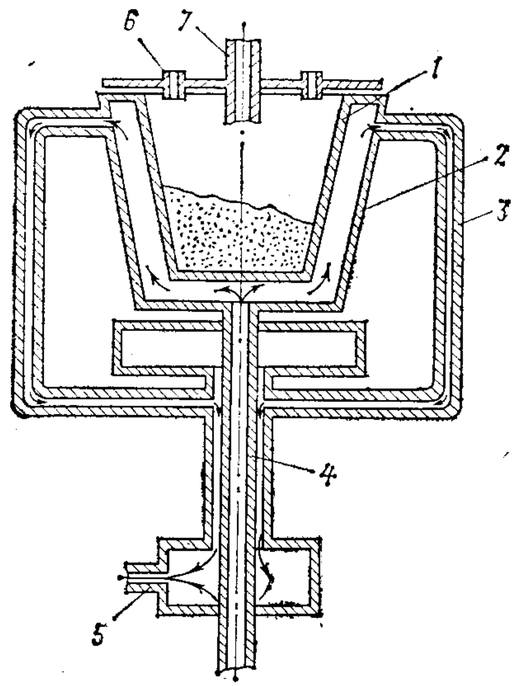


Рис. 8.7. Схема формы для ротационного формования, оснащенной системой индивидуального жидкостного термостатирования:
1 — форма; *2* — рубашка; *3* — трубы для вывода теплоносителя; *4* — полый вал; *5* — расширительный бак; *6* — отверстия для вывода летучих; *7* — трубка для подачи холодного воздуха.

Наличие воздуха в порошкообразных сырьевых материалах обусловливает необходимость оснащения форм устройствами для удаления газов из формующей полости. Чаще всего для этого используются металлические трубки диаметром 3—6 мм, соединяющие формующую полость с атмосферой.

Разъемные формы состоят обычно из двух полуформ с фланцами, уплотнений по плоскости разъема и запорных устройств. Запорные устройства создают усилие запирания $p_з$, рассчитываемое по формуле

$$p_з = k_з S_р p \qquad (8.1)$$

где $k_з$ — коэффициент запаса ($k_з = 1{,}2$); $S_р$ — площадь проекции оформляющей полости формы на плоскость разъема; p — давление материала на стенки формы, равное 0,14—0,15 МПа.

Формы для ротационного формования установок непрерывного действия нагреваются в печах газовым пламенем, горячим воздухом или инфракрасным излучением. Обогрев газовым пламенем эффективен, однако его применение ограничено нагревом стальных форм (для нагрева форм из других металлов он не применяется во избежание разрушения их в результате перегрева). Обогрев горячим воздухом применяется при формовании изделий с малой толщиной стенок (до 1,5 мм). Инфракрасный обогрев эффективен для нагрева одиночных форм простой конфигурации.

В последнее время для нагрева ротационных форм стали использовать расплавы солей, например смеси нитратов натрия и калия. Расплавленная при температуре 473—573 К смесь разбрызгивается на поверхности вращающейся формы, равномерно прогревая ее стенки.

Толщина стенки формы зависит от ее конфигурации, размеров, материала формы и способа нагрева. Так, для алюминиевых форм толщина стенки при изготовлении изделия простой конфигурации из порошков термопластов при нагреве горячим воздухом составляет 5—6,5 мм, при нагреве расплавами солей — 10—15 мм.

В установках периодического действия нашли применение формы с системой индивидуального жидкостного термостатирования. Одна из конструкций такой формы схематически представлена на рис. 8.7. Форма *1* оснащена рубашкой *2* для подачи теплоносителя, который вводится через полый вал *4*, а выводится по трубам *3* и через расширительный бак *5*. Отверстия *6* служат для вывода газообразных и летучих веществ. Для ускорения процесса охлаждения готовых изделий через трубку *7* в полость формы может подаваться холодный воздух. Агрегаты с системой индивидуального жидкостного термостатирования могут быть легко автоматизированы, обладают высокой производительностью, занимают небольшие производственные площади.

8.3. СУЩНОСТЬ МЕТОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМОВАНИЯ

Центробежное формование является способом изготовления осесимметричных изделий путем заливки материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, во вращающуюся форму. Под действием центробежных сил материал распределяется по оформляющей поверхности плотным слоем, приобретая при затвердевании требуемую конфигурацию. Центробежным формованием перерабатываются специальные заливочные композиции (компаунды) на основе полиэфирных, эпоксидных и других связующих, капролактама, полиакрилатов, полиэтилена низкой плотности, полиамидов, пастообразные формовочные композиции (пластизоли) на основе поливинилхлорида. Этим же методом могут перерабатываться тонкодисперсные сыпучие полимерные материалы в виде порошков и гранул. Затвердевание материала при вращении формы происходит либо за счет протекания реакции отверждения (для термореактивных материалов), либо вследствие снижения температуры формы ниже температуры стеклования $T_с$ или температуры плавления $T_{пл}$ (для термопластичных материалов).

В отличие от ротационного формования в данном методе вращение формы, как правило, осуществляется вокруг одной оси — вертикальной, горизонтальной или наклонной (под углом α к горизонтали). Центробежные силы, действующие в материале при вращении формы с частотой до 200 $с^{-1}$, обусловливают возникновение в композиции значительного давления. Благодаря действию этого давления из материала в процессе формования вытесняются пузырьки воздуха и газообразных продуктов реакции отверждения, а также предотвращается возникновение внутренних напряжений в готовом изделии из-за усадки материала, достигающей значительной величины при отверждении в отсутствие давления.

Технологическими параметрами метода центробежного формования являются частота вращения формы N, температура стенки формы $T_ф$ и продолжительность формования $t_ф$. Частота

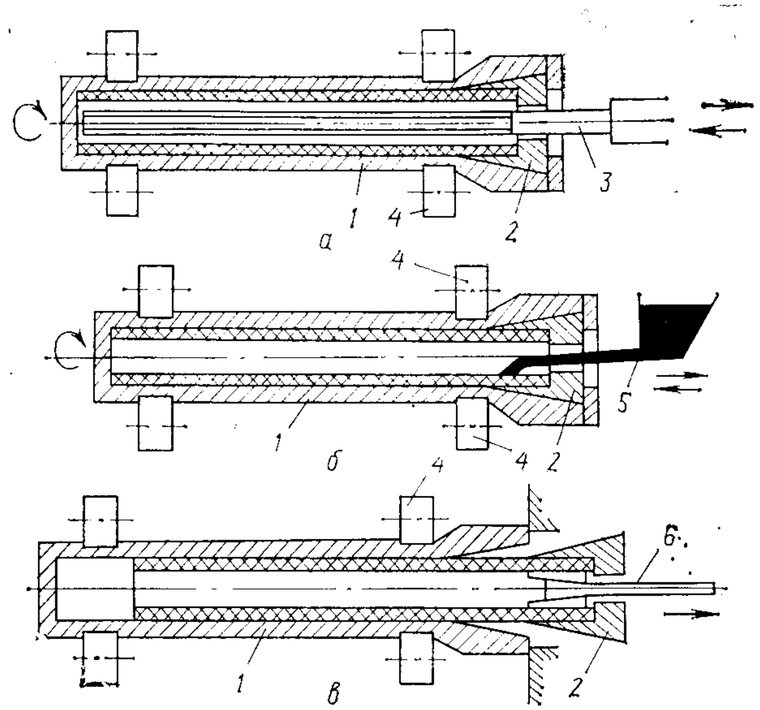


Рис. 8.8. Схема центробежного формования стеклопластиковых труб (*а—в* — стадии формования):
1 — форма; *2* — фланец; *3* — штанга для укладки наполнителя; *4* — ролики-опоры; *5* — питатель; *6* — штанга механизма извлечения трубы.

вращения формы N должна превышать определенную критическую величину $N_{кр}$, при которой материал удерживается центробежными силами по всей поверхности формы. При $N<N_{кр}$ жидкий материал стекает со стенок формы и проведение процесса формования становится невозможным. Точное теоретическое определение $N_{кр}$ представляет значительную трудность, поэтому на практике значение $N_{кр}$ находят опытным путем. Так, для капролона и полиамида $N_{кр}=20$ $с^{-1}$, для волокнонаполненных эпоксидных компаундов величина $N_{кр}=60$ $с^{-1}$. Продолжительность процесса формования определяется скоростью нагрева материала до температуры, близкой к $T_ф$, и скоростью отверждения при этой температуре или скоростью охлаждения до температуры формоустойчивости, меньшей $T_с$ или $T_{пл}$.

Технологический процесс производства стеклонаполненных труб методом ротационного формования проиллюстрирован на рис. 8.8. На первой стадии процесса в неразъемной форме *1* с помощью передвижной штанги *3* происходит укладка и уплотнение стеклопластикового наполнителя (рис. 8.8, *а*). Далее форма *1* начинает вращаться в роликах-опорах *4* и через питатель *5* в нее вводится связующее (рис. 8.8, *б*). Связующее в зависимости от диаметра и длины формуемой трубы может подаваться либо равномерно по всей длине формы, либо с одного или двух концов формы, откуда оно растекается под действием центробежных сил по всей поверхности формы. После оконча-

ния процесса отверждения связующего в отформованную трубу вводится штанга *6* механизма извлечения трубы; труба зажимается между съемным фланцем *2* и штангой *6* и удаляется из формы.

Оборудование для центробежного формования подразделяется на разновидности по ряду технологических и конструктивных признаков. Существуют специализированные центробежные установки для переработки компаундов, пластизолей и порошков, отличающиеся конструкцией устройств для дозирования и формования сырьевого материала. Существует оборудование для производства труб, шестерен, емкостей и других изделий. Установки для центробежного формования могут иметь вертикальную и горизонтальную оси вращения или ось вращения с изменяющимся углом наклона к горизонтальной оси. В последнем случае упрощается извлечение готового изделия из формы.

8.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМОВАНИЯ

Установка для центробежного формования с вертикальной осью вращения, представленная на рис. 8,9, предназначена для переработки полиамидов. Она оснащена неразъемной цилиндрической чашей *4*, внутри которой может устанавливаться форма. Чаша *4* имеет привод от электродвигателя *7* через клиноременную передачу, состоящую из ступенчатых клиновых шкивов *1* и *6* и ремня *2*. Скорость вращения измеряется тахометром *5*. Чаша закрывается снаружи кожухом *3*.

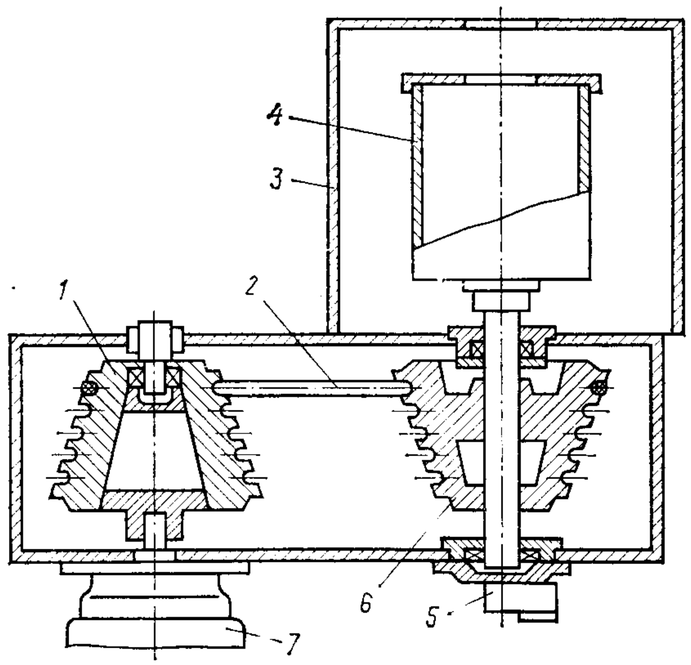


Рис. 8.9. Установка для центробежного литья изделий из полиамидов:
1, 6 — клиновые шкивы; *2* — ремень; *3* — кожух; *4* — чаша; *5* — тахометр.

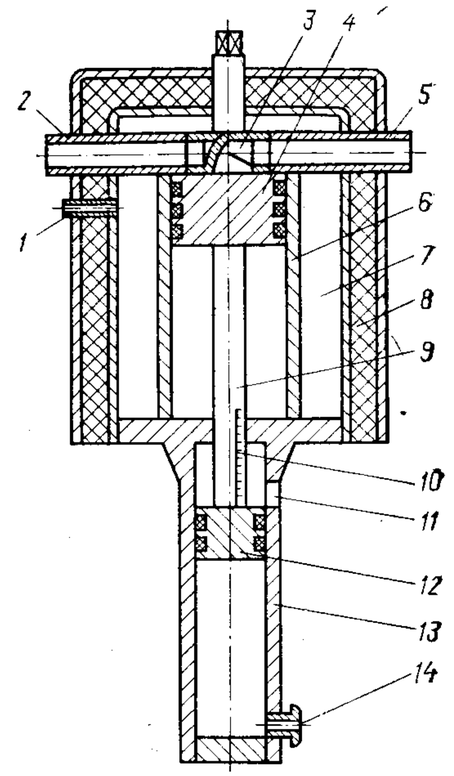


Рис. 8.10. Дозатор установки для центробежного литья полиамидов:
1, 14 — штуцеры; *2* и *5* — магистрали для нагнетания материала в форму и подачи сырья на дозирование соответственно; *3* — клапан; *4* — дозирующий поршень; *6* — цилиндр; *7* — рубашка; *8* — теплоизоляция; *9* — шток дозирующего поршня; *10* — шкала контроля; *11* — смотровое окно; *12* — поршень пневмоцилиндра; *13* — пневмоцилиндр.

Установка имеет дозирующее устройство, показанное на рис. 8.10. Дозатор состоит из цилиндра *6* с рубашкой обогрева *7*, защищенной теплоизоляцией *8*. Дозирующий поршень *4* со штоком *9* перемещается с помощью поршня *12*, расположенного в пневмоцилиндре *13*. Штуцера *14* и *1* служат для ввода сжатого воздуха и теплоносителя соответственно. Через смотровое окно *11* контролируется с помощью шкалы *10* количество материала, нагнетаемого в форму. Клапан *3* соединяет цилиндр *6* с магистралью *2* нагнетания материала в полость формы или с магистралью *5*, по которой поступает сырье на дозирование из смесителя или реактора.

Форма для центробежного литья изготавливается из бронзы, алюминия или стального литья. В данной конструкции ча-

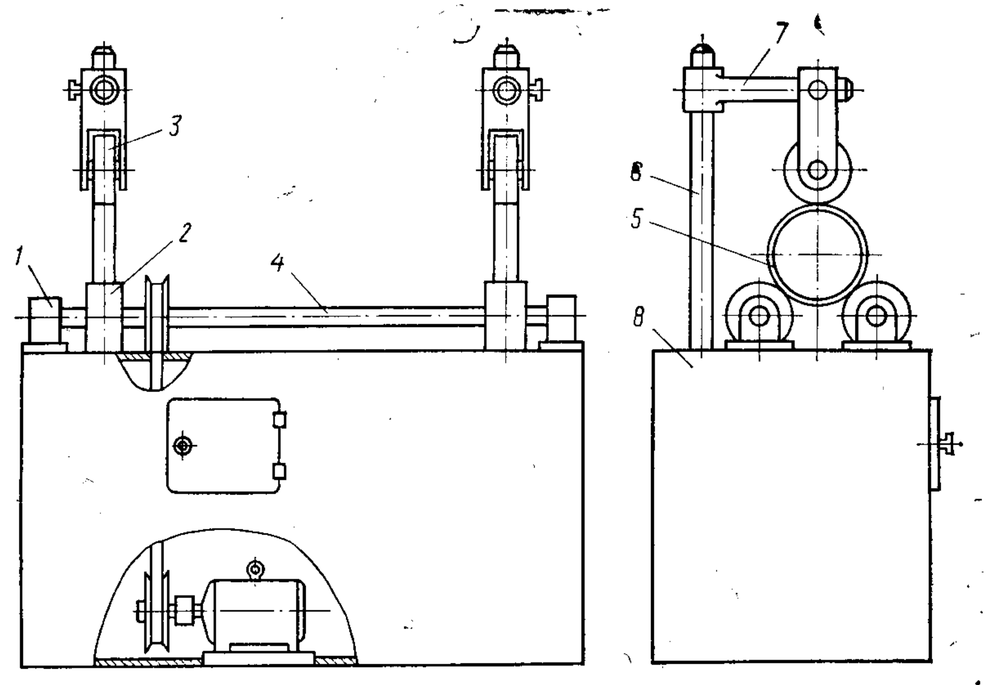


Рис. 8.11. Установка для центробежного литья труб:
1 — подшипник; *2* — приводной ролик; *3* — прижимной ролик; *4* — вал; *5* — формующая труба; *6* — колонна; *7* — кронштейн; *8* — станина.

ша *4* (см. рис. 8.9) не обогревается, а формование изделия из расплавленного капролактама происходит в холодной вращающейся форме при частоте вращения 30—40 $с^{-1}$.

Примером конструкции агрегата с горизонтальной осью вращения может служить установка для получения труб, показанная на рис. 8.11. Установка имеет станину *8*, на которой в подшипниках *1* установлено два вала *4*. На каждом из этих валов укреплены по два приводных ролика *2*. На приводных роликах укладывается формующая труба *5*, которая вращается с частотой 30—50 $с^{-1}$. Прижимной ролик *3* перемещается вдоль колонны *16* на кронштейне *7*. Формующая труба *5* заполняется расплавом материала, закрывается с обоих концов и приводится во вращение до окончания процесса формования.

ГЛАВА 9

ВАЛКОВЫЕ МАШИНЫ

9.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦОВ И КАЛАНДРОВ

Вальцы и каландры — наиболее распространенный тип валковых машин в промышленности переработки пластмасс и резиновых смесей. Рабочими органами этих машин являются вращающиеся навстречу друг другу валки (рис. 9.1). Вальцы, как правило, имеют два валка, каландры — от двух до пяти валков.

При *вальцевании* материал в виде непрерывной ленты, отдельных кусков, сухой смеси порошкообразных или волокнистых компонентов подается непрерывно или периодически в область *1* над межвалковым зазором *2* (рис. 9.1, *а*). Возникающей

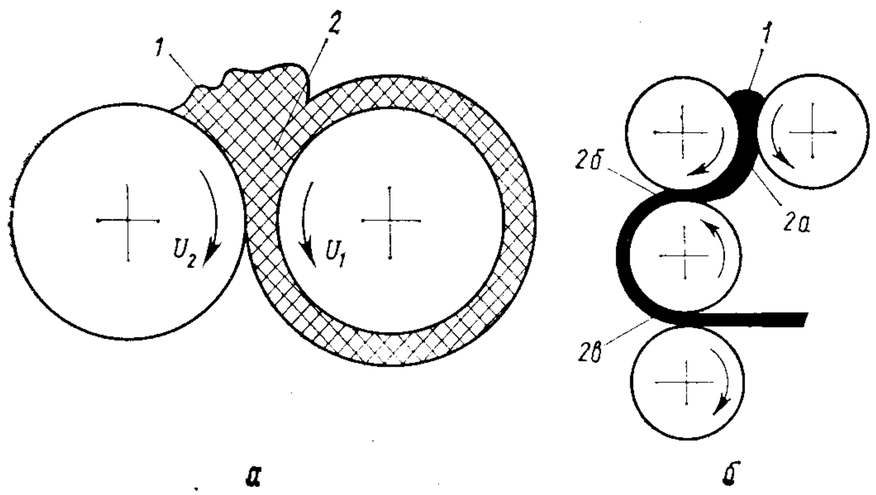


Рис. 9.1. Схема расположения рабочих органов вальцов (*а*) и каландра (*б*). Пояснения в тексте.

при контакте с вращающимися валками силой трения материал вовлекается в межвалковый зазор. Движение в сужающемся зазоре сопровождается интенсивным деформированием материала и уплотнением его, если он загружается в виде рыхлой массы. Выполнение разнообразных операций на валковых машинах возможно именно благодаря этому деформированию. С целью интенсификации деформирования рабочим поверхностям валков часто сообщают различные окружные скорости ($U_1 < U_2$). Отношение U_1/U_2 называется *коэффициентом фрикции* λ.

Выходя из зазора в виде листа, материал (если он пребывает в вязкотекучем или пластическом состоянии) прилипает к одному из валков. Как правило, это валок, рабочая поверхность которого имеет меньшую скорость.

Если материал обрабатывается на вальцах, то, выйдя из зазора и сделав вместе с тихоходным валком полный оборот, он вновь попадает в область *1* и затем в зазор *2*. Таким образом, за время своего пребывания на вальцах материал подвергается деформированию многократно. Это время (*время вальцевания*) подбирается таким, чтобы в материале успевал завершиться тот процесс, который определяет сущность конкретной технологической операции, выполняемой на вальцах (смешение, прогрев, дробление и др.).

Вальцы могут работать в периодическом и непрерывном режимах. При *периодическом режиме* порция материала загружается в пространство *1* и обрабатывается в течение времени вальцевания. По его истечении слой материала на вращающемся тихоходном валке подрезается ножом, перемещающимся вдоль его образующей, и готовый материал снимается с поверхности валка в виде листа. При *непрерывном режиме* работы материал постоянно подается в один из концевых участков области *1*, простирающейся по всей длине валков. При вальцевании материал непрерывно смещается вдоль оси валка и срезается в виде ленты на противоположном его конце стационарно установленным ножом.

На вальцах, как правило, выполняются технологические операции, целью которых является изменение физического состояния или химического строения материала.

При *каландровании* материал в вязкотекучем состоянии загружается в область *1* и последовательно проходит зазоры 2а, 2б и 2в, образованные валками (рис. 9.1, *б*). В отличие от обработки на вальцах, основной целью технологических операций, выполняемых на каландрах, является не изменение состояния или строения материала, а придание ему формы листа (пленки) или наложение слоя материала заданной толщины на листовой материал, непрерывно подаваемый в зазор 2б или 2в. В связи с этим требования к качеству поверхности валков и точности поддержания зазоров между ними для каландров более высокие, чем для вальцов. Другие особенности каландров

состоят в том, что они работают только в непрерывном режиме и материал пребывает в каждом зазоре только однократно.

Взаимное расположение валков вальцов таково, что их оси лежат в горизонтальной плоскости; условия загрузки и удержания материала в области *1* (ее часто называют «запасом» или «прибылью») при этом варианте их расположения максимально благоприятны. Взаимное расположение валков каландров может быть самым различным.

9.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ НА ВАЛКОВЫХ МАШИНАХ

Помимо основных, постоянно действующих механизмов вальцы и каландры могут оснащаться различными вспомогательными механизмами, конструкция и назначение которых зависят от конкретной технологической операции, которая должна выполняться на этих машинах.

9.2.1. Операции, выполняемые на вальцах

Листование. Это простейшая операция, выполняемая на вальцах. Необходимость в этой операции возникает в том случае, если материал, подлежащий переработке каким-либо способом, находится в виде кусков, что неудобно с точки зрения его хранения и подачи в перерабатывающую машину. Например, приготовленная в резиносмесителе резиновая смесь выходит из рабочей камеры в виде бесформенных кусков массой 30 кг и более. При переработке смесей литьем под давлением в пластикационный цилиндр литьевой машины должен подаваться материал в виде ленты. Ленту получают при вальцевании выходящих из смесителя кусков, непрерывно срезая материал с тихоходного валка вальцов и наматывая ее на бобины. При прессовании изделий из резиновых смесей используются заготовки различного диаметра толщиной 5—20 мм, вырубаемые также из полученного на вальцах листа.

Чтобы придать выходящему из резиносмесителя уже прогретому материалу конфигурацию листа, нет необходимости в интенсивном деформировании его в межвалковом зазоре, поэтому листовальные вальцы имеют коэффициент фрикции не более 1,1.

Подогрев и питание. Работа деформирования материала в межвалковом зазоре превращается в тепло, приводящее к повышению температуры обрабатываемого материала. Благодаря этому вальцы используют для непрерывного питания каландров и экструзионных машин лентой разогретого материала. Интенсивное деформирование в межвалковом зазоре, ускоряющее прогрев, в данном случае желательно, поэтому подогревательные вальцы имеют коэффициент фрикции, больший чем листовальные: 1,3—1,4.

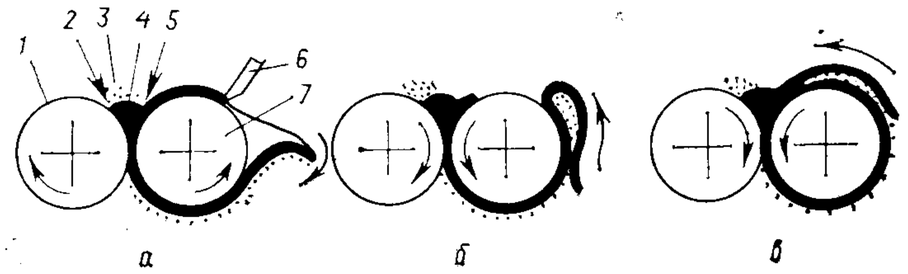


Рис. 9.2. Выполнение операции подрезания при приготовлении резиновых смесей. Пояснения в тексте.

Смешение. Смешение двух или нескольких материалов, находящихся в вязкотекучем состоянии, или одного вязкотекучего материала с порошкообразными твердыми компонентами возможно на вальцах благодаря их интенсивному деформированию во время пребывания в межвалковом зазоре. На вальцах готовят: резиновые смеси; композиции на основе поливинилхлорида с добавками стабилизаторов, красителей и др.; термореактивные композиции для переработки их прессованием и литьем под давлением.

При приготовлении резиновых смесей на вальцах предварительно обрабатывают каучук с целью уменьшения его вязкости, а затем в пространство, занятое запасом *4* (рис. 9.2), последовательно подают порошкообразные компоненты *3*. Кинематика движения материала в запасе такова (см. разд. 9.4.1), что эти компоненты, распределяясь по поверхности запаса и быстроходного валка *1*, затягиваются в межвалковый зазор в месте, показанном стрелкой *2* (и в меньшей степени — в месте, отмеченном стрелкой *5*). При этом они оказываются преимущественно на поверхности контакта валка *1* и каучука в межвалковом зазоре. На выходе же из зазора они прилипают к наружной поверхности слоя каучука на валке *7*. Если не предпринимать дополнительных мер, то внедрение частиц с поверхностного слоя в массу каучука будет очень длительным.

Для интенсификации внедрения выполняют прием подрезания. Перемещением ножа *6* (рис. 9.2, *а*) вдоль образующей валка отслаивают каучук от валка *7*. Отслоенная часть под действием собственного веса накладывается на вновь поступающий слой (рис. 9.2, *б*). Частицы добавок, таким образом, оказываются уже не на поверхности, а в середине сдвоенного слоя и в таком виде вновь затягиваются в зазор (рис. 9.2, *в*). Операции подрезания выполняются в течение цикла смешения многократно. Сложное движение ножа, включающее в себя подвод к валку, выстой в течение $^1/_{10}$—$^1/_3$ оборота валка, смещение вдоль образующей на заданную длину и отвод от валка, выполняется на промышленных вальцах современных конструкций автоматически с помощью специального механизма.

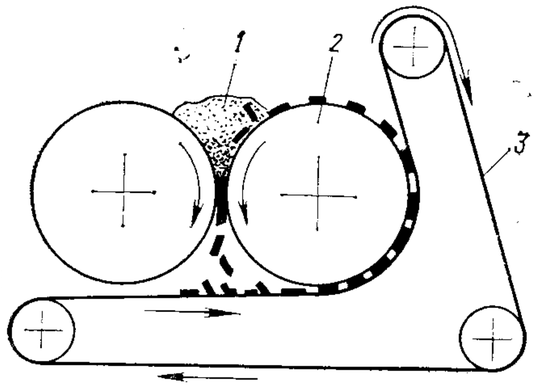


Рис. 9.3. Вальцевание сухих смесей термореактивных композиций:
1 — прибыль; *2* — горячий валок; *3* — ленточный транспортер.

Процесс достижения нужной степени смешения резиновой смеси оказывается столь длительным, что вследствие диссипации работы деформирования смесь нагревалась бы до недопустимо высоких температур, если бы во внутреннюю полость валков не подавалась вода. Также во избежание перегрева смеси коэффициент фрикции у смесительных вальцов делают не больше 1,3, несмотря на то, что при увеличении его интенсифицируется деформирование и ускоряется процесс смешения.

При приготовлении термореактивных композиций (рис. 9.3) в прибыль *1* подается сухая смесь всех компонентов, включая частицы связующего (смолы) размерами 0,5—3 мм. Смешение начинается, когда связующее переходит в жидкое состояние, нагреваясь за счет контакта с обогреваемыми в данном случае валками. Однако лишь малая доля частиц смолы за короткое время однократного пребывания в зазоре плавится и пропитывает прочие компоненты. Основная масса не прилипает к валку *2*, а выйдя из зазора, свободно просыпается. Возвращает ее в прибыль ленточный транспортер *3*, приводимый в движение специальным механизмом. Транспортер же, как видно из рис. 9.3, обеспечивает практически непрерывный контакт материала с горячим валком *2*, интенсифицируя тем самым прогрев и плавление смолы.

Пластикация каучука. При интенсивном деформировании каучука в межвалковом зазоре в нем возникают столь высокие сдвиговые напряжения, что под их воздействием начинается процесс механодеструкции — разрыв цепных молекул, приводящий к уменьшению молекулярной массы и, следовательно, вязкости. Эта особенность процесса вальцевания позволяет подготавливать высоковязкие каучуки к смешению на смесительных вальцах.

По мере снижения вязкости каучука при пластикации напряжения в нем уменьшаются, и процесс механодеструкции может прекратиться еще до достижения требуемой молекулярной массы. Поддерживать большие значения напряжений при снижающейся вязкости можно, увеличивая интенсивность деформирования посредством уменьшения межвалкового зазора. Необходимость изменения зазора возникает и в других случаях. В связи с этим во всех конструкциях вальцов (и каландров также) имеются механизмы регулирования зазора.

Рафинирование. Эта операция состоит в очистке резиновых смесей, каучуков и регенерата от твердых включений. Рабочая поверхность валков рафинирующих вальцов гладкая, бочкообразная, так что межвалковый зазор увеличивается от середины валков к их краям. Вследствие этого твердые включения в обрабатываемом материале выдавливаются к краям валков и срезаются там ножами вместе с частью материала.

Дробление, измельчение. Вышедшие из эксплуатации резинотканевые изделия (преимущественно автомобильные покрышки) подвергаются вторичной переработке. Для этого изделия режут на крупные куски, затем подвергают дроблению и измельчению с одновременным отслаиванием частиц разрушенной тканевой основы от резины. Резиновая крошка затем подвергается девулканизации.

Операции дробления, измельчения и раздира выполняют на вальцах, которые имеют коэффициент фрикции от 3 до 4 (соответственно при дроблении и измельчении). Благодаря большой разности окружных скоростей валков в зазоре и происходит раздир. Для лучшего захвата кусков и вовлечения их в зазор, а также во избежание проскальзывания материала по валкам в зазоре рабочие поверхности валков выполняют рифлеными.

Промывка и отжим. Эти операции проводятся чаще всего для очистки натурального каучука от механического загрязнения при его получении и транспортировании. Используемые для промывки вальцы имеют коэффициент фрикции 1,3—1,4.

9.2.2. Операции, выполняемые на каландрах

На каландрах получают листовые заготовки из сырых резиновых смесей, листы и пленки из термопластичных материалов толщиной от 0,05 до 2 мм, линолеум, а также листы и пленки из двух слоев различных материалов (совмещение слоев называют дублированием). Кроме того, на каландрах выполняют операции по односторонней или двухсторонней обкладке или промазке тканей и корда резиновой смесью, а также операцию тиснения поверхности уже сформованного листового материала.

Рассмотрим порядок выполнения этих операций на универсальном четырехвалковом каландре (рис. 9.4). Как видно из рис. 9.4, *а*, каландр помимо основных рабочих органов (четырех валков *1*, *2*, *6* и *7*) имеет множество вспомогательных механизмов: транспортеры для подачи резиновой смеси (*4* и *10*) и для приема готового изделия или полуфабриката (*5*); приводные (*8* и *11*) или свободно вращающиеся (*3*, *12*, *13*, *14*) ролики для протягивания, направления или прижима к валку листовых материалов; наконец, кронштейн *15* для установки на нем шпуль, на которые наматывается (или с которых сматывается) рулонный материал.

Двухсторонняя обкладка металлокордного полотна (рис. 9.4, *а*). Корд *16* приводным *8* и прижимным *9* роликами

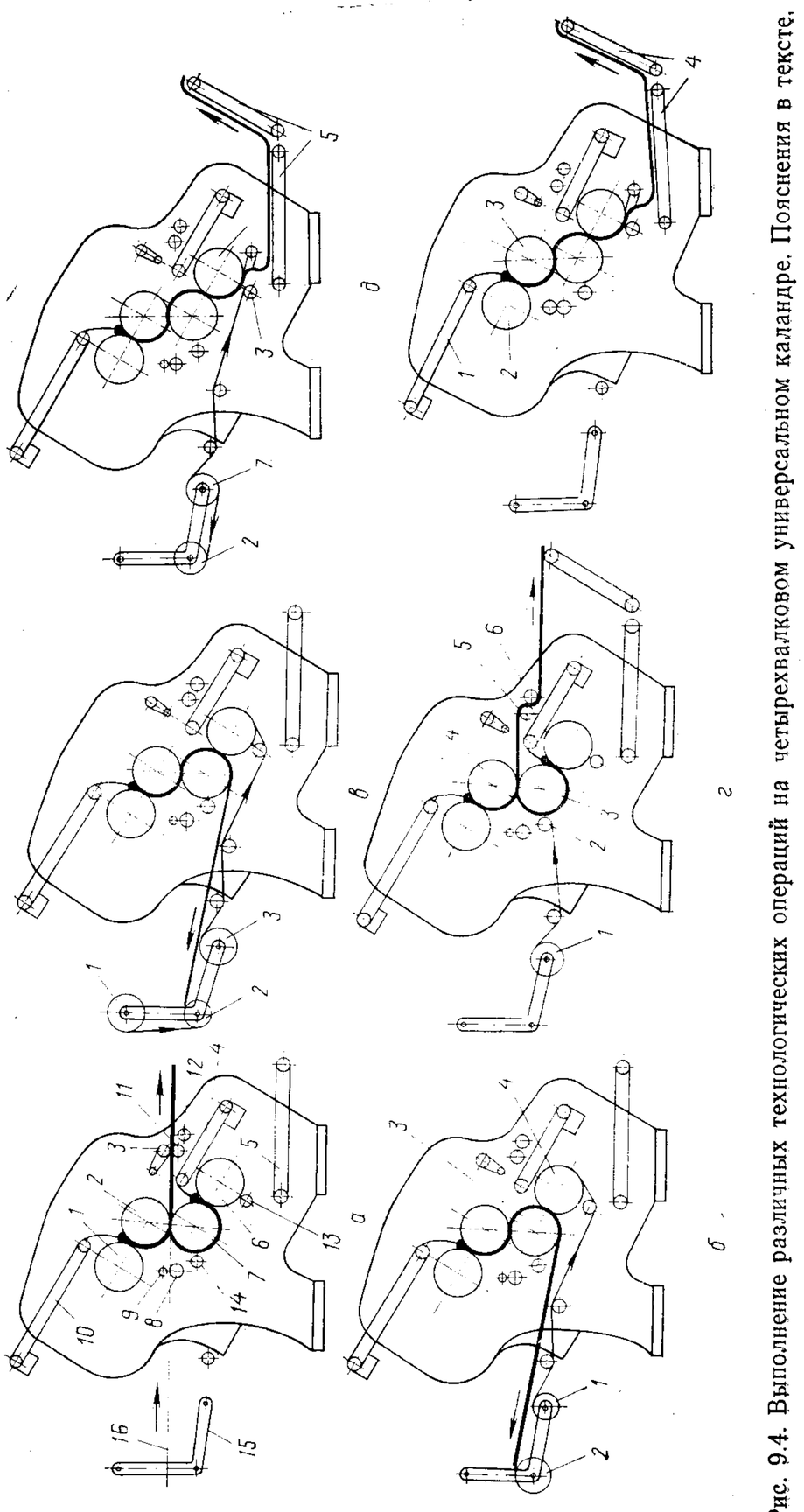


Рис. 9.4. Выполнение различных технологических операций на четырехвалковом универсальном каландре. Пояснения в тексте.

подается в зазор между валками *2* и *7*. Резиновая смесь в виде ленты транспортерами *10* и *4* непрерывно подается в зазоры между валками *1* и *2*, а также *6* и *7* соответственно. Выходя из этих зазоров, смесь в виде двух листов накладывается на корд сверху и снизу и совместно с ним поступает в зазор между валками *2* и *7*. В зазоре под действием развившегося в нем давления смесь проникает в пустоты между нитями корда и монолитизируется с ним. Готовый материал принимается приводным *11* и откидным прижимным *3* роликами. Фрикция между валками *2* и *7*, осуществляющими обкладку, невелика или совсем отсутствует.

Односторонняя обкладка ткани (рис. 9.4, *б*). Ткань, сматываясь с рулона *1*, проходит через три направляющих ролика и затягивается в зазор между валками *3* и *4*, куда поступает также и резиновая смесь. Прежде чем попасть в зазор, ткань некоторое время находится в контакте с горячим валком *4* и прогревается, что повышает надежность последующего соединения ее с резиновой смесью. Обкладка осуществляется при практическом отсутствии фрикции между валками *3* и *4*. При промазке коэффициент фрикции может иметь значение до 1,4. Разность скоростей валков способствует более глубокому проникновению резины в поры ткани. Готовая ткань, выйдя из зазора, наматывается на среднюю приводную шпулю *2*.

Если необходима обкладка второй стороны ткани (рис. 9.4, *в*), то рулон снимают со средней шпули *2* и устанавливают вновь на нижнюю шпулю *3*, на верхней же шпуле *1* устанавливается рулон прокладочной ткани. Обкладка осуществляется, как показано на рис. 9.4, *б*. На шпулю *2* вместе с тканью, покрытой с двух сторон смесью, наматывается прокладочная ткань, предотвращающая слипание продукта в рулоне.

Одновременная двухсторонняя промазка (рис. 9.4, *г*). Ткань, сматываясь с рулона *1*, валиком *2* прижимается к горячей смеси на валке *3* и затем попадает в зазор между валками *3* и *4*, где встречается со вторым слоем смеси. Приводным *5* и прижимным *6* роликами прорезиненная ткань подается на последующую обработку или на намотку в рулон с прослоечной тканью.

Дублирование (рис. 9.4, *д*). Его выполняют, если, например, на прорезиненную с двух сторон ткань необходимо наложить дополнительный слой резиновой смеси. Прорезиненная ткань сматывается с рулона *1*, причем прокладочная ткань, предотвращавшая слипание рулона, тут же наматывается на шпулю *2*. Подлежащая дублированию ткань, проходя через направляющие валики, прижимным валиком *3* прикатывается к слою резиновой смеси на валке *4* и сразу подается на приемный транспортер *5*.

Листование резиновой смеси (рис. 9.4, *е*). Резиновая смесь транспортером *1* подается в зазор между валками *2* и *3* предварительной калибровки. Последующее двухкратное пребыва-

ние в межвалковых зазорах обеспечивает высокую точность окончательной калибровки. Готовый лист отводится от каландра транспортером.

9.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ВАЛКОВЫХ МАШИН

В соответствии с ГОСТ 14333—73, отечественными предприятиями выпускаются вальцы следующих типов: лабораторные (Лб), подогревательные (Пд), смесительные (См), дробильные (Др), промывные (Пр), размалывающие (Рз), рафинирующие (Рф) и смесительно-подогревательные (См-Пд). Эти типы отличаются коэффициентом фрикции, характером рабочей поверхности валков (цилиндрическая или бочкообразная, гладкая или рифленая) и набором вспомогательных механизмов.

В рамках каждого из типов существует размерный ряд вальцов, отличающихся по длине и диаметру рабочей части валков. В соответствии с рекомендациями СЭВ, размерный ряд валков вальцов (диаметр×длина, мм) следующий: 490××800; 550×800; 550×1500; 660×2100 — для переднего по отношению к рабочему месту вальцовщика, тихоходного валка; 610×800; 550×800; 550×1500; 600×2100 — для заднего валка.

Обозначение типоразмера вальцов включает в себя информацию об их параметрах. Например, обозначение

$$\text{Пд } 800\ \frac{550}{550}\ \text{П}$$

соответствует подогревательным вальцам, имеющим диаметры переднего и заднего валков 550 мм, их длину 800 мм и привод валков, расположенный справа от них.

По технологическому признаку каландры делятся на *листовальные, промазочные, обкладочные (дублирующие)* и *тиснильные*. Эти типы каландров, так же как и вальцы, различаются коэффициентом фрикции и набором вспомогательных механизмов. Все они выпускаются с приводом, позволяющим изменять частоту вращения валков в интервале 1—10. Минимальная (заправочная) окружная скорость поверхности валков должна быть не более 6 м/мин.

Кроме отмеченных специализированных типов выпускаются *универсальные лабораторные* и *промышленные* каландры. Конструкция последних предусматривает бесступенчатое изменение коэффициента фрикции валков и достаточно полный набор вспомогательных механизмов.

Основные классификационные конструктивные признаки каландров — это *число валков* и *их размеры*. Ряд длин валков каландров определен в ГОСТ 11993—71 следующим образом: 320; 500; 600; 1250; 1500; 2800 мм. Рекомендации СЭВ содержат такой размерный ряд валков каландров (диаметр×длина, мм): 500×1250; 710×1800; 950×800. Обо-

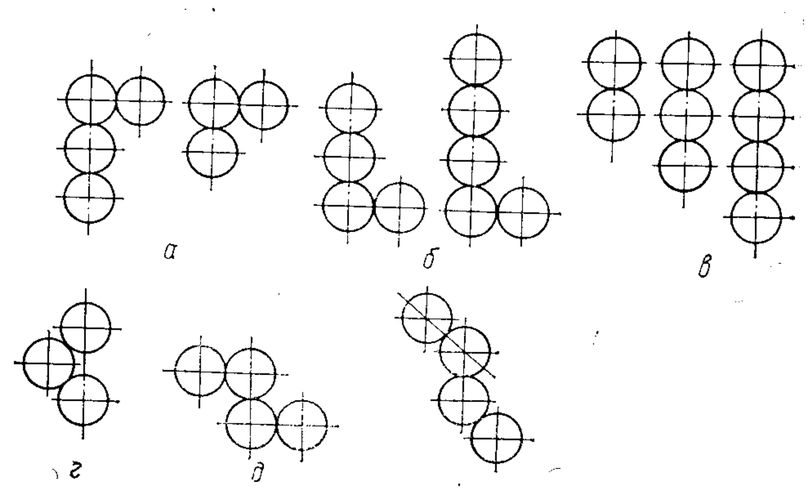


Рис. 9.5. Варианты взаимного расположения валков каландров:
а — Г-образное; *б* — *L*-образное; *в* — вертикальное; *г* — треугольное; *д* — *Z*-образное; *е* — *S*-образное.

значение каландров (например, 3-710-1800П) содержит информацию о количестве валков (3), их диаметре (710 мм) и длине (1800 мм), а также о расположении привода (правое).

Последний из основных конструктивных признаков, по которым классифицируют каландры, — это *взаимное расположение валков*. На рис. 9.5 показаны различные варианты расположения валков.

9.4. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В МЕЖВАЛКОВОМ ЗАЗОРЕ

9.4.1. Поле скоростей и давлений

Материал, находясь в вязкотекучем состоянии, в области запаса прилипает к рабочим поверхностям валков, имеющих окружные скорости U_1 и U_2, и затягивается ими в межвалковый зазор с высотой h, переменной по его длине (рис. 9.6). Область течения материала по длине межвалкового зазора лежит между координатой верхней точки запаса $x_н$ и координатой $x_к$, при которой слой материала разобщается с рабочей поверхностью одного из валков (в данном случае — с поверхностью левого валка). При интенсивном деформировании материала в этой области возникает давление p. Так как в начале и в конце области (т. е. при $x_н$ и $x_к$) давление равно нулю, то эпюра распределения давления p вдоль координаты x должна иметь максимум при некоторой координате $x_м$.

Так как центральный угол α, охватывающий область деформирования, как правило, очень мал, то векторы окружных скоростей валков U_1 и U_2, и, следовательно, векторы скоростей частиц материала в этой области практически параллельны оси x. В связи с этим будем считать, что существуют только

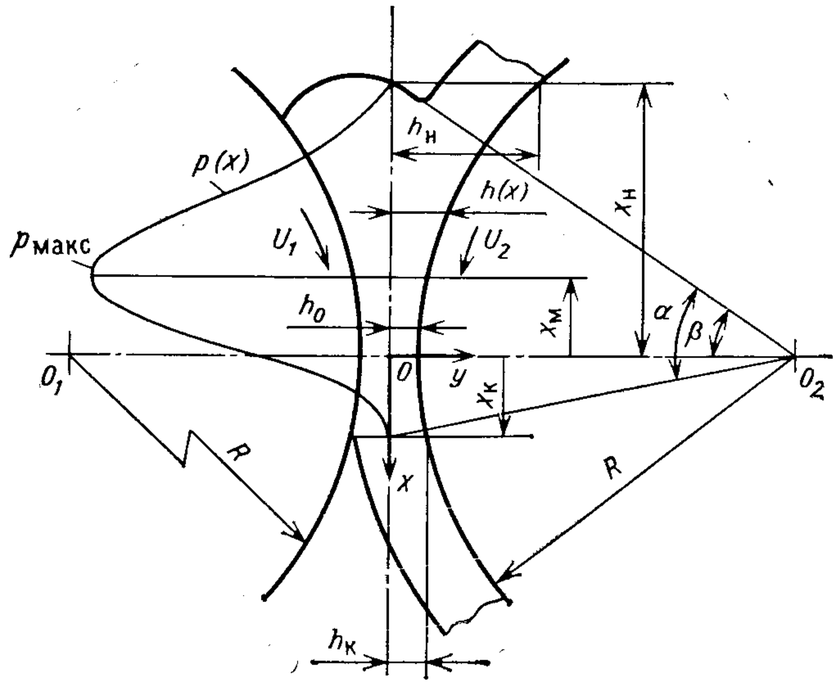


Рис. 9.6. Схема течения материала в межвалковом зазоре. Пояснения в тексте.

компоненты скоростей материала и валков, направленные вдоль оси x. Будем также считать, что скорости валков равны:

$$U_1 = U_2 = U \tag{9.1}$$

Картина течения в зазоре в этом случае становится симметричной относительно оси x.

Рекомендации по учету реально существующей фрикции будут даны ниже.

Уравнение движения материала при сделанных допущениях может быть получено так же, как и в случае, описанном на с. 149:

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{d^2v}{dy^2} \tag{9.2}$$

где v — скорость материала.

Так как большинство обрабатываемых на вальцах и каландрах материалов представляет собой неньютоновские жидкости, то входящая в уравнение (9.2) вязкость η есть функция интенсивности деформирования материала в межвалковом зазоре. Метод определения среднего в зазоре значения вязкости приведен в разд. 9.4.4.

Граничные условия уравнения (9.2) таковы:

$$\text{а)}\ \left.\frac{dv}{dy}\right|_{y=0} = 0; \qquad \text{б)}\ v\Big|_{y=\pm h(x)} = U; \qquad \text{в)}\ p\Big|_{x=x_н} = 0;$$

$$\text{г)}\ p\Big|_{x=x_к} = 0 \tag{9.3}$$

Приближенно принимая, что p и dp/dx не зависят от y, выполняем интегрирование (9.2) по y на интервале от 0 до y при условии (9.3а) и получаем

$$\frac{dv}{dy} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} y \tag{9.4}$$

Выполняя интегрирование (9.4) по y на интервале от h до y при условии (9.3б), получаем формулу для поля скоростей в зазоре:

$$v(y, x) = U - \frac{h^2 - y^2}{2\eta} \frac{dp(x)}{dx} \tag{9.5}$$

Из (9.5) видно, что скорость имеет две составляющие. Эпюры этих составляющих в поперечном сечении зазора, соответствующих первому (I) и второму (II) слагаемым формулы (9.5), показаны на рис. 9.7, *а*. Первая составляющая по всему сечению равна окружной скорости валков U и определяет вынужденный поток в зазоре. Наличие второй составляющей обусловлено перепадом давления в зазоре. Направление этой составляющей, как видно из (9.5), определяется знаком производной dp/dx: на участке возрастания давления (участок от $x_н$ до $x_м$ на рис. 9.6) направление ее противоположно вынужденному потоку, и результирующая эпюра скоростей выглядит так, как это показано на рис. 9.7, *а*. Как видно, скорость срединной

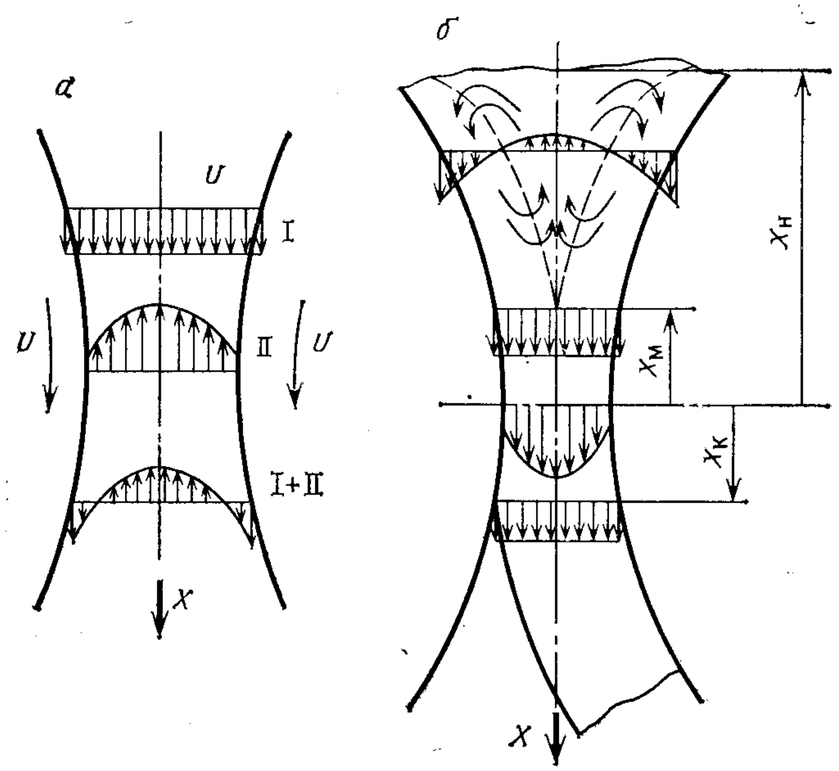


Рис. 9.7. Поле скоростей в межвалковом зазоре. Пояснения в тексте.

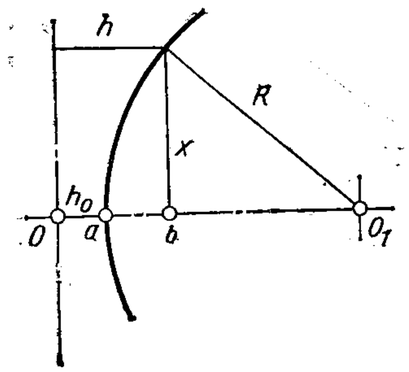


Рис. 9.8. К выводу функции $h(x)$.

области результирующего потока направлена в сторону, противоположную направлению вращения валков.

Ширина области обратного течения (отмечена штриховыми линиями на рис. 9.7, *б*) уменьшается в направлении x и при $x_м$ становится равной нулю: при $x_м$ производная dp/dx равна нулю, и второе слагаемое в (9.5) отсутствует. На участке же от $x_м$ до $x_к$ направления обеих составляющих совпадают.

Наличие области обратного течения обусловливает циркуляцию материала в верхней части зазора (на рис. 9.7, *б* показана стрелками), что существенно интенсифицирует процесс смешения.

Расход q через зазор на единичной ширине его в направлении оси валка определяется интегралом

$$q = 2\int_0^h v\,dy \qquad (9.6)$$

Вводя (9.5) в (9.6), получаем следующее выражение для расхода:

$$q = 2h\left(U - \frac{h^2}{3\eta}\,\frac{dp}{dx}\right) \qquad (9.7)$$

Входящие в (9.7) переменные h и x связаны геометрическим соотношением, очевидным из рис. 9.8:

$$h = Oa + ab = Oa + (aO_1 - O_1b) = h_0 + (R - \sqrt{R^2 - x^2}) =$$
$$= h_0 + R - R\sqrt{1 - (x/R)^2} \qquad (9.8)$$

где h_0 — значение h при $x=0$.

Разлагая радикал в (9.8) в степенной ряд и ограничиваясь двумя слагаемыми его, получаем

$$\sqrt{1 - (x/R)^2} \approx 1 - 0{,}5\,(x/R)^2 \qquad (9.9)$$

Вводя (9.9) в (9.8), получаем зависимость $h(x)$:

$$\text{а)}\ h = h_0(1 + \xi^2); \qquad \text{б)}\ \xi = x/\sqrt{2Rh_0} \qquad (9.10)$$

где ξ — безразмерный аналог координаты x; фиксированным значениям $x_н$, $x_м$ и $x_к$ соответствуют значения $\xi_н$, $\xi_м$ и $\xi_к$.

Чтобы получить формулу, описывающую распределение давления по координате ξ, разрешим (9.7) относительно dp/dx и введем в полученное выражение вместо x новую переменную ξ, а также функцию $h(\xi)$ согласно (9.10):

$$\frac{dp}{d\xi} = \sqrt{\frac{2R}{h_0}}\,\frac{3\eta U}{h_0}\,\frac{1 + \xi^2 - q/(2Uh_0)}{(1 + \xi^2)^3} \qquad (9.11)$$

Согласно (9.11), производная $dp/d\xi$ обращается в ноль при двух значениях ξ, представляющих собой корни квадратного уравнения

$$1 + \xi^2 - q/(2Uh_0) = 0 \qquad (9.12)$$

Эти корни ξ_1 и ξ_2 равны по абсолютной величине и противоположны по знаку:

$$\xi_1 = -\sqrt{q/(2Uh_0) - 1}; \qquad \xi_2 = +\sqrt{q/(2Uh_0) - 1} \qquad (9.13)$$

Очевидно, что первый корень ξ_1 соответствует максимальному значению $p(\xi)$ при $\xi_м$ (см. рис. 9.6). Второй же корень ξ_2 может быть равен только координате $\xi_к$, при которой материал покидает область деформирования. Действительно, экстремум (точнее, минимум) на кривой $p(\xi)$ не может существовать в интервале $\xi_м < \xi < \xi_к$, так как в противном случае либо не будет удовлетворено граничное условие (9.3г), либо возникнет область отрицательных давлений, но оба эти варианта противоречат физическому представлению о процессе в рамках принятых допущений. Таким образом

$$\xi_м = \xi_1; \qquad \xi_к = \xi_2 \qquad (9.14)$$

В уравнении (9.11) слагаемые $1 - q/(2Uh_0)$, стоящие в числителе третьего сомножителя, заменим согласно (9.13) и (9.14) на $\xi^2_к$ и выполним интегрирование по ξ, использовав граничное условие (9.3г):

$$p(\xi) = \frac{3\eta U}{4h_0}\sqrt{\frac{R}{2h_0}}\,[f_1(\xi_к, \xi) + c(\xi_к)] \qquad (9.15)$$

где

$$f_1(\xi_к, \xi) = (\xi^2 - 5\xi_к^2 - 3\xi_к^2\xi - 1)\,\xi/(1 - \xi^2)^2 + (1 - 3\xi_к^2)\,\mathrm{arctg}\,\xi \qquad (9.15а)$$

$$c(\xi_к) = \frac{1 + 3\xi_к^2}{1 + \xi_к^2}\,\xi_к - (1 - 3\xi_к^2)\,\mathrm{arctg}\,\xi_к \qquad (9.15б)$$

Формула (9.15) должна удовлетворять также и граничному условию (9.3в), поэтому приравняв в (9.15) p к нулю и вместо ξ введя в него значение $\xi_н$, получаем соотношение

$$f_1(\xi_к, \xi)\big|_{\xi=\xi_н} = -c(\xi_к) \qquad (9.16)$$

Это соотношение устанавливает взаимосвязь между координатами входа материала в зону деформирования и выхода из

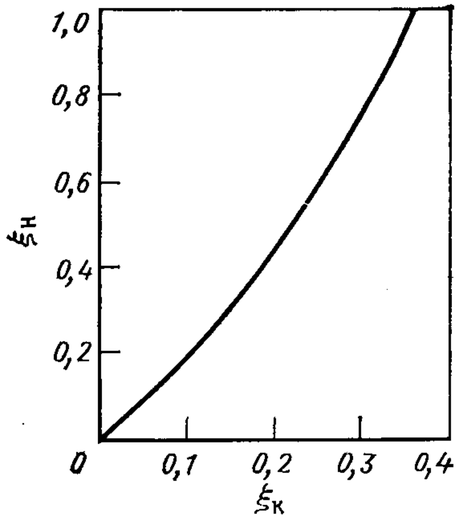


Рис. 9.9. Зависимость между $\xi_н$ и $\xi_к$.

нее. В графическом виде зависимость (9.16) представлена на рис. 9.9.

Для случая вальцевания с фрикцией получаются формулы и соотношения, полностью подобные приведенным выше, однако в них вместо U необходимо подставлять среднюю скорость валков $\tilde{U}$:

$$\tilde{U} = (U_1 + U_2)/2 \qquad (9.17)$$

9.4.2. Толщина листа и производительность валковой пары

Если пренебречь упругим последействием по выходе слоя материала из области деформирования в межвалковом зазоре, то толщина получаемого листа δ равна высоте зазора $2h_к$ при координате $\xi_к$:

$$\delta = 2h_к \equiv 2h(\xi)\big|_{\xi=\xi_к} \qquad (9.18)$$

Координата $\xi_к$, в соответствии с (9.16), зависит от $\xi_н$, т. е. от величины запаса, который может регулироваться оператором каландра. Однако увеличение запаса сверх некоторой критической величины $\xi_н^{макс}$ приводит к тому, что материал в области $\xi > \xi_н^{макс}$ уже не захватывается валками и не находится в контакте с ними. Величина $\xi_н^{макс}$ определяется следующим условием захвата материала валками:

$$\beta \leqslant \operatorname{arctg} f \qquad (9.19)$$

где β — угол захвата материала (см. рис. 9.6); f — коэффициент трения материала по поверхности валка*.

Вытекающее из (9.19) условие для определения $\xi_н^{макс}$ имеет вид

$$\xi_н^{макс} = \xi_н\big|_{\beta=\beta_{макс}=\operatorname{arctg} f} \qquad (9.20)$$

Таким образом, порядок вычисления толщины выходящего из валковой пары листа следующий: принимают значение угла захвата не больше чем $\beta_{макс}$; вычисляют $x_н = R\,\mathrm{tg}\beta_{макс}$ (см. рис. 9.6); по (9.10б) находят $\xi_н$; по графику на рис. 9.9 определяют $\xi_к$; по (9.10а) вычисляют $h_к$; по (9.18) находят δ.

* Коэффициент трения f для материала в вязкотекучем состоянии при температуре каландрования должен определяться при очень малых усилиях прижатия его к поверхности трения во избежание прилипания к ней.

Производительность Q равна

$$Q = qL \qquad (9.21)$$

где L — рабочая длина валка.

Если известна величина $\xi_к$, то q можно вычислить по формулам (9.14), (9.13б), где $\xi_2 = \xi_к$.

9.4.3. Распорное усилие, крутящий момент на валке и мощность привода валка

Развивающееся в области деформирования в межвалковом зазоре давление p создает распорное усилие T, стремящееся раздвинуть валки (рис. 9.10). Выражение для T имеет вид

$$T \approx \int_{x_н}^{x_к} p(x)\,L dx \approx \sqrt{2Rh_0}\int_{\xi_н}^{\xi_к} p(\xi)\,L d\xi \qquad (9.22)$$

Усилия T направлены к центрам валков O_1 и O_2, однако не лежат на линии центров O_1O_2, так как эпюра давления $p(x)$ не симметрична относительно оси y. Смещение направления действия T от линии центров O_1O_2 невелико вследствие малости угла α, охватывающего область деформирования, поэтому при силовом и прочностном расчетах вальцов и каландров этим смещением можно пренебречь.

Знак приближенного равенства в выражении (9.22) объясняется тем, что T есть алгебраическая сумма элементарных сил $p(x)Ldx$, что строго соответствует действительности, если силы имеют одно направление. Реально же направление их действия зависит от координаты их приложения x, так как они действуют нормально к цилиндрической поверхности валка. Приближение

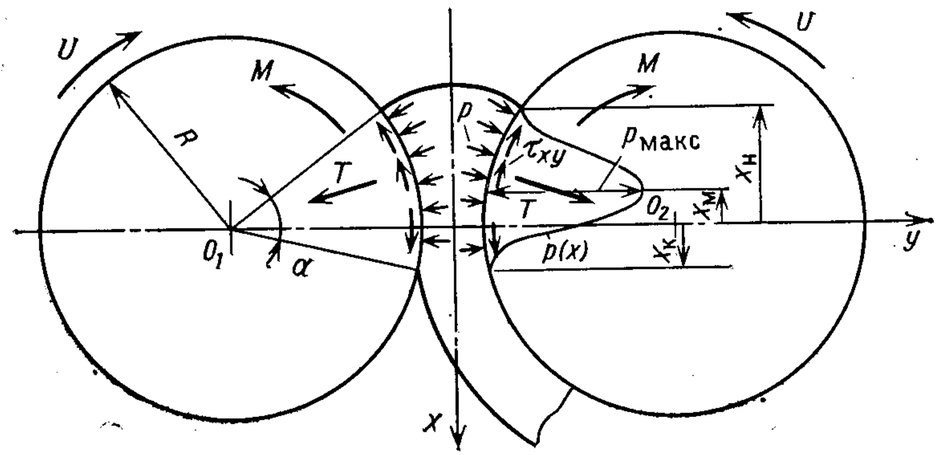


Рис. 9.10. Схема силовых факторов, действующих на рабочую часть валка. Пояснения в тексте.

(9.22) тем не менее достаточно точно, поскольку угол охвата α мал.

Вводя в (9.22) выражение для распределения давления (9.15), получаем формулу для расчета распорного усилия:

$$T = [3\eta RU/(4h_0)]\, f_2(\xi_н, \xi_к) \qquad (9.23)$$

где

$$f_2(\xi_н, \xi_к) = [(\xi_к + \xi_н)/(1 + \xi_н^2)]\,[\xi_н - \xi_к + 5\xi_к^3(1 + \xi_н^2)] + \\ + (1 - 3\xi_к^2)(\xi_к^2 \operatorname{arctg} \xi_к - \xi_н \operatorname{arctg} \xi_н)$$

На рис. 9.11 для упрощения расчетов f_2 представлена как функция одной переменной $\xi_к$, так как между переменными $\xi_к$ и $\xi_н$ существует отмеченная выше однозначная взаимосвязь (см. рис. 9.9).

Со стороны деформируемого материала на поверхности валка действуют касательные напряжения τ_{xy}, создающие момент сопротивления вращению валка M (см. рис. 9.10). Элементарная окружная сила dF, действующая на поверхность валка, равна

$$dF = \tau_{xy}\big|_{y=h} L dx \qquad (9.24)$$

Соответствующий ей элементарный момент сопротивления dM равен

$$dM = RdF \qquad (9.25)$$

Вводя (9.24) в (9.25) и выполняя интегрирование на интервале от $x_н$ до $x_к$, получаем выражение для полного момента сопротивления:

$$M = RL\int_{x_н}^{x_к} \tau_{xy}(x)\Big|_{y=h} dx = RL\sqrt{2Rh_0}\int_{\xi_н}^{\xi_к} \tau_{xy}(\xi)\Big|_{y=h} d\xi \qquad (9.26)$$

Функция $\tau_{xy}(x)|_{y=h}$ определяется следующим образом. Уравнение движения материала в межвалковом зазоре, как уже отмечалось в разд. 9.4.1, подобно (4.29а) и имеет вид

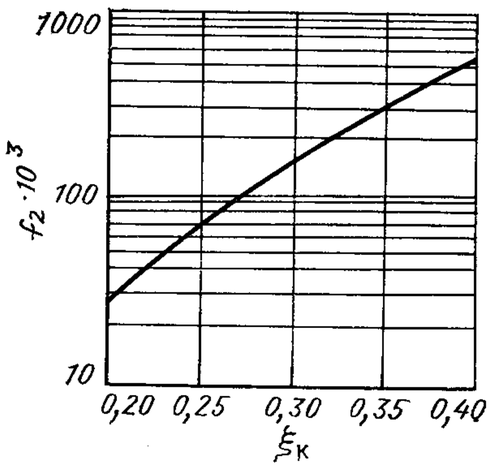


Рис. 9.11. Вид функции $f_2(\xi_к)$.

$$dp/dx = d\tau_{xy}/dy \qquad (9.27)$$

причем напряжение сдвига в материале связано со скоростью сдвига следующим образом:

$$\tau_{xy} = \eta\,(dv/dy) \qquad (9.28)$$

При учете граничного условия (9.3а) из (9.28) следует:

$$\tau_{xy}\big|_{y=0} = 0 \qquad (9.29)$$

Интегрируя (9.27) по y при новом граничном условии (9.29), получаем

$$\tau_{xy} = \frac{dp}{dx}\, y = \frac{1}{\sqrt{2Rh_0}}\,\frac{dp}{d\xi}\, y \qquad (9.30)$$

Из (9.30) видно, что направление τ_{xy} определяется знаком производной dp/dx: так как она меняет знак при $x = x_м$ (см. рис. 4.6 и 4.10), то и касательные напряжения τ_{xy}, в интервале $x_н < x < x_м$ препятствующие вращению валка, при переходе в интервал $x_м < x < x_к$ меняют направление и здесь уже способствуют его вращению. Однако вследствие несимметричности эпюры $p(x)$ относительно ординаты $p_{макс}$ ширина первого из отмеченных интервалов существенно больше, так что равнодействующая от касательных напряжений в этом интервале превосходит таковую для второго, нижнего интервала. В итоге момент M направлен в сторону, противоположную вращению.

Введем (9.30) в выражение для M (9.26) и выполним интегрирование, для чего предварительно: положим $y = h$ и h примем в соответствии с (9.10а); выражение для $dp/d\xi$ примем в соответствии с (9.11), в котором слагаемые $1 - Q/(2Uh_0)$, согласно (9.13) и (9.14), заменим на $\xi^2_к$.

В результате получаем выражение для расчета момента сопротивления вращению валка M:

$$M = 3LU\eta R\sqrt{2R/h_0}\, f_3(\xi_н, \xi_к) \qquad (9.31)$$

где

$$f_3(\xi_н, \xi_к) = (1 - \xi_к^2)(\operatorname{arctg} \xi_к - \operatorname{arctg} \xi_н) + \\ + (\xi_н + \xi_н\xi_к^2 + \xi_к + \xi_н^2\xi_к)/(1 + \xi_н^2)$$

Мощность W, необходимая для вращения валка, определяется как

$$W = M\omega \qquad (9.32)$$

где ω — угловая скорость вращения валка.

При расчетах мощности привода валков необходимо учитывать к. п. д. всех элементов привода. Обязательным также является учет потерь мощности в подшипниках валков. Вследствие больших распорных усилий, передающихся с валков на подшипники, эти потери значительны.

9.4.4. Вязкость материала в межвалковом зазоре

Вязкость, входящая во все приведенные в разд. 9.4.1—9.4.3 выражения, зависит от скорости деформирования материала (скорости сдвига $\dot{\gamma}$) и температуры его в зазоре в соответствии

с формулой (4.32). Скорость сдвига и температура существенно различны в различных точках пространства зазора, однако все выводы, приведенные в этих разделах, сделаны при допущении, что вязкость материала во всей области зазора постоянна, но зависит от средних в зазоре скорости сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ и температуры $\tilde{T}$. Найдем выражение для средней скорости сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$.

Если в формуле (9.5) переменные x и y заменим их безразмерными аналогами ξ [см. (9.10)] и $\psi=y/h$ и введем в нее выражение (9.11) для производной $dp/d\xi$, то получим уравнение, описывающее поле скоростей в межвалковом зазоре:

$$v(\xi, \psi) = U[3\psi^2(\xi^2 - \xi_к^2) + 3\xi_к^2 - \xi^2 + 2]/[2(1+\xi^2)] \qquad (9.33)$$

Дифференцируя (9.33) по y, получаем формулу для скорости сдвига $\dot{\gamma}(\xi, \psi)$:

$$\dot{\gamma}(\xi, \psi) = \frac{dv}{dy} = \frac{dv}{d\psi}\frac{d\psi}{dy} = \frac{3U}{h_0}\frac{\psi(\xi^2 - \xi_к^2)}{(1+\xi^2)^2} \qquad (9.34)$$

Из (9.34) видно, что в любом из поперечных сечений зазора (т. е. при любой координате ξ) скорость сдвига равна нулю в середине сечения (при $\psi=0$) и максимальна у стенок валков (при $\psi=1$). Среднеарифметическое значение скорости сдвига в сечении равно

$$\frac{\dot{\gamma}(\xi, 0) + \dot{\gamma}(\xi, 1)}{2} = \frac{3U}{2h_0}\frac{\xi^2 - \xi_к^2}{(1+\xi^2)^2} \qquad (9.35)$$

Из (9.35) следует, что средняя в сечении скорость сдвига равна нулю на выходе из зазора (при $\xi=\xi_к$) и максимальна по абсолютной величине при $\xi=0$. Таким образом, среднее в зазоре значение скорости сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ имеет следующее выражение:

$$\tilde{\dot{\gamma}} = 3U\xi_к^2/(4h_0) \qquad (9.36)$$

При вычислениях по формулам, приведенным в разд. 9.4.1—9.4.3, вязкость η следует определять по формуле (4.32), в которой значение скорости сдвига $\dot{\gamma}$ должно быть рассчитано по формуле (9.36).

Мощность привода во вращение валков, образующих зазор, затрачивается на деформирование находящегося в нем материала, вследствие чего последний прогревается. Таким образом, температура материала на выходе из зазора $T_к$ оказывается несколько большей, чем на входе в него $T_н$. Среднюю в зазоре температуру $\tilde{T}$ можно приближенно определить по формуле

$$\tilde{T} = (T_н + T_к)/2$$

причем температура $T_н$ материала, поступающего в зазор, как

правило, известна. Величина $T_к$ может быть вычислена из уравнения энергетического баланса

$$2W = Q\rho c(T_к - T_н)$$

где W — мощность привода одного валка, определяемая по формуле (9.32); Q — производительность, определяемая формулой (9.21); ρ и c — плотность и удельная теплоемкость материала соответственно.

Следует отметить, что мощность W, в соответствии с формулами (9.31), (9.32) и (4.32), сама зависит от $\tilde{T}$ и, следовательно, от неизвестной $T_к$. Вводя в уравнение энергетического баланса выражения (9.32) для W, (9.31) для M и (4.32) для η, в котором принимаем $T=\tilde{T}=0{,}5(T_н+T_к)$, получаем трансцендентное уравнение для определения $T_к$:

$$6\omega LUR\sqrt{\frac{2R}{h_0}}\, m_0\dot{\gamma}^{n-1}\exp\left[\frac{2E}{R(T_н+T_к)}\right] f_з(\xi_н, \xi_к) = Q\rho c(T_к - T_н)$$

Решение этого уравнения возможно путем итеративной процедуры на ЭВМ.

При каландровании термопластичных материалов и низковязких резиновых смесей повышение температуры материала в зазоре незначительно и его можно не учитывать, однако в случае высоковязких резиновых смесей расчет распорного усилия и мощности привода валков (см. разд. 9.4.1—9.4.3) должен выполняться с использованием значения вязкости η при температуре $\tilde{T}$, методика определения которой приведена в этом разделе.

9.5. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ МАШИН

Общий вид вальцов показан на рис. 9.12. Основные узлы вальцов смонтированы на станине, представляющей собой две Н-образные рамы *12* и *14*, укрепленные нижними стойками на фундаментной плите *13*. Верхние стойки каждой рамы охвачены траверсой *3* и образуют вместе с перекладиной рамы прямоугольное отверстие, в котором располагаются корпусы *2* и *22* подшипников валков *7* и *24*.

Величина межвалкового зазора у всех вальцов регулируется бесступенчато, поэтому подшипники *2* валка *24* укреплены на станине неподвижно винтами *23*, а подшипники *22* второго валка *7* могут смещаться в прямоугольном отверстии станины в горизонтальном направлении. Смещение их вместе с валком *22* осуществляется механизмами регулирования зазора *18*. Эти механизмы укреплены на стойках станины.

При обработке на валках материал может смещаться в области запаса вдоль валков и при этом выходить за пределы их рабочей части, что недопустимо. Во избежание этого валки оснащены ограничительными стрелами *4* и *8*. Каждая стрела представляет собой две частично перекрывающие друг друга плас-

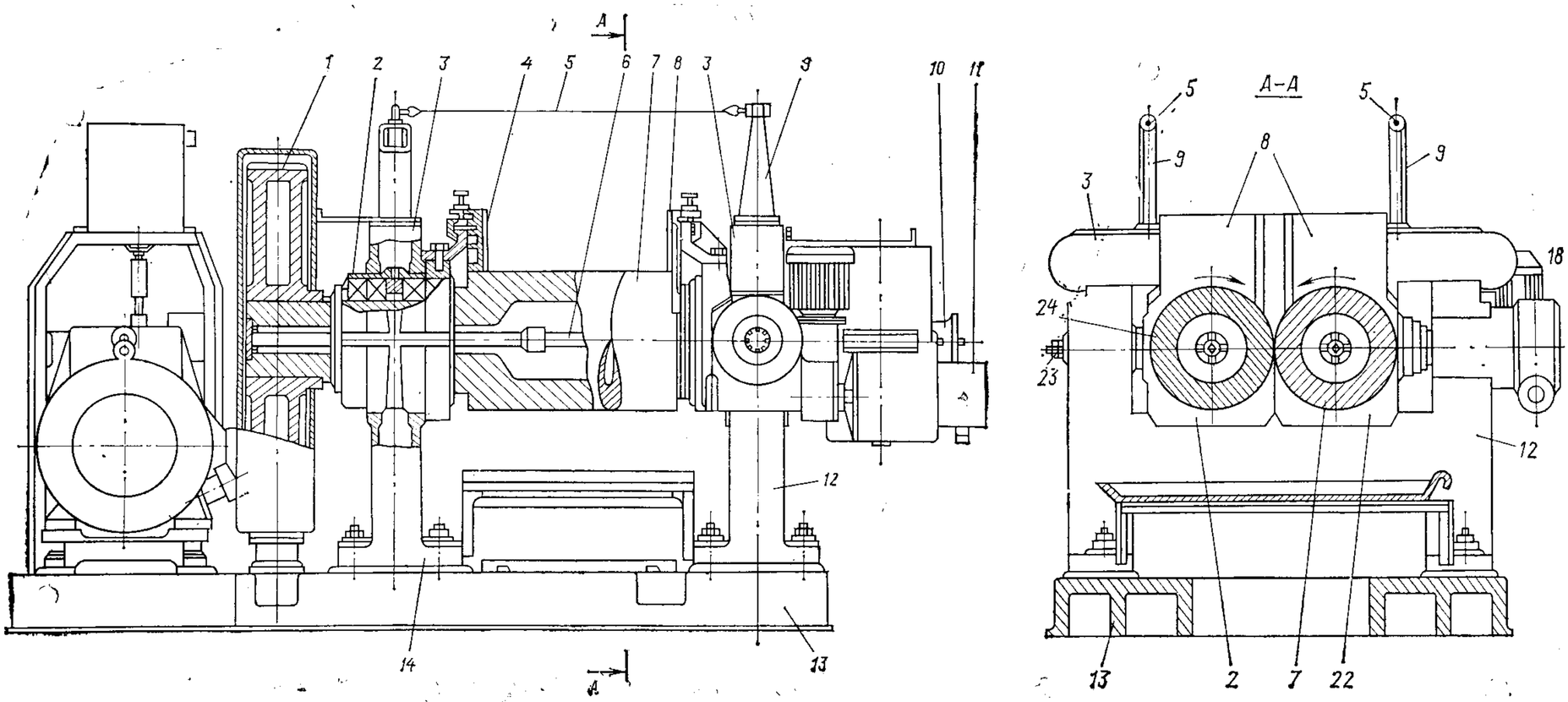


Рис. 9.12. Общий вид вальцов:

1 — зубчатое колесо; *2* — корпус подшипника; *3* — траверса; *4* — стрела; *5* — тросик аварийного останова вальцов; *6* — труба охлаждения валка; *7* — передний валок; *8* — стрела; *9* — стойки; *10* — воронка; *11* — приемная ванна; *12, 14* — рама станины; *13* — фундаментная плита; *15* — шестерня; *16, 17* — зубчатые пары; *18* — механизмы регулирования межвалкового зазора; *19* — электродвигатель; *20* — тормоз; *21* — редуктор; *22* — корпус подшипника; *23* — винт; *24* — задний валок.

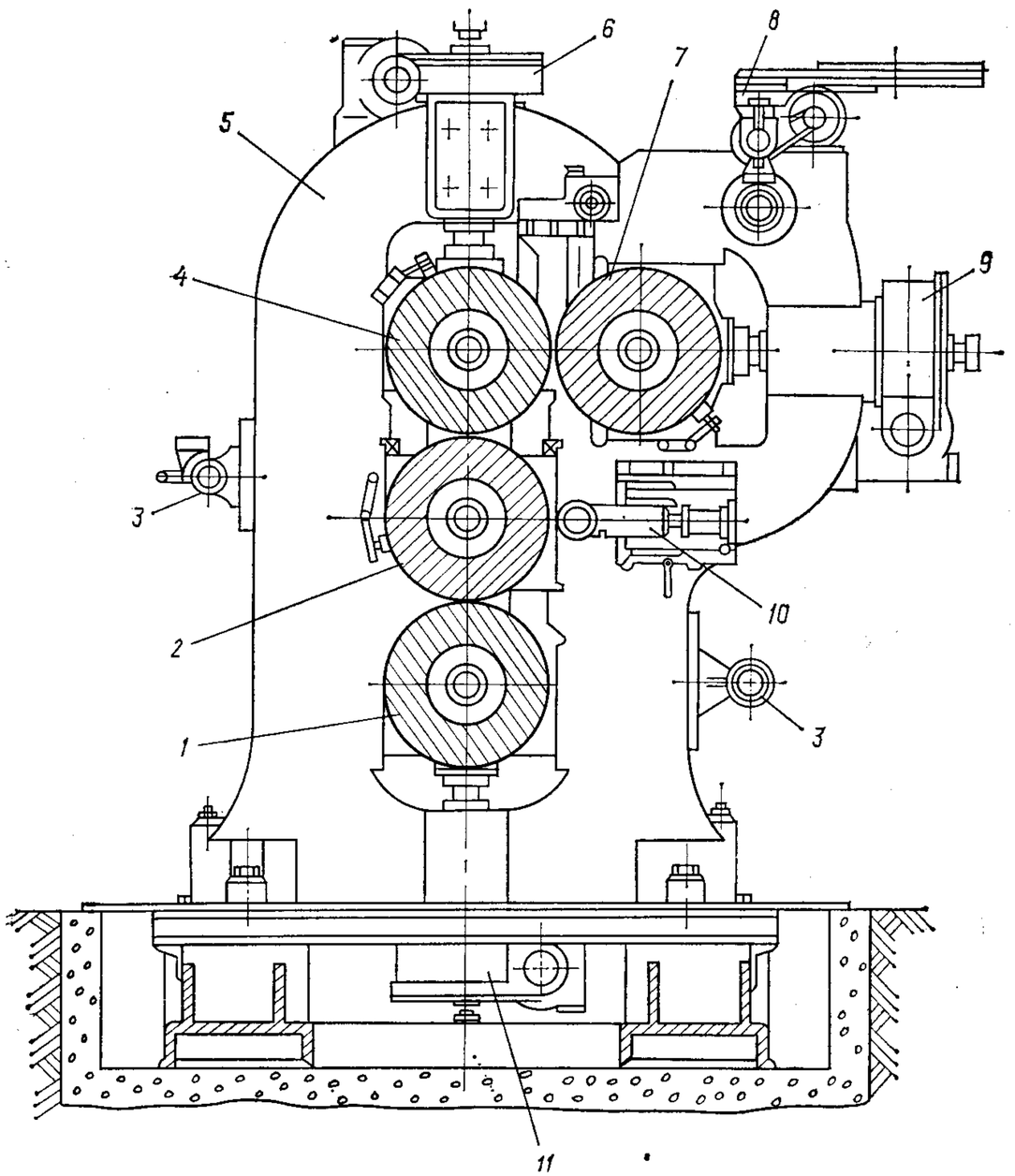


Рис. 9.13. Г-образный четырехвалковый каландр:

1 — нижний валок; *2* — средний валок; *3* — направляющие валики; *4* — верхний валок; *5* — рама станины; *6* — механизм регулирования зазора между верхним и средним валками; *7* — выносной валок; *8* — питающее устройство; *9* — механизм регулирования зазора между верхним и выносным валками; *10* — прижимной валик; *11* — механизм регулирования зазора между нижним и средним валками.

тины; нижней поверхностью каждая из них охватывает верхнюю часть своего валка. Пластины укреплены на корпусах подшипников подвижного и неподвижного валков. При раздвигании валков вместе с подшипниками пластины смещаются, однако зазора между ними не образуется из-за перекрывания ими друг друга.

Валки полые; внутренняя поверхность их охлаждается водой, подаваемой через трубу *6*. Отработавшая вода свободно

сливается через воронки *10*, укрепленные на правых концах валков, в приемную ванну *11*.

Вращение валкам от электродвигателя *19* передается через редуктор *21*. Между ними установлен ленточный или колодочный тормоз *20*. Все эти элементы смонтированы на фундаментной плите *13*. На выходном валу редуктора имеется шестерня *15*, передающая вращение колесу *1*, неподвижно надетому на левый хвостовик заднего валка *24*. На правые хвостовики валков также неподвижно надеты шестерни *16* и *17*; они находятся во взаимном зацеплении и передают вращение с заднего на передний валок. Зубчатые пары *15*, *1* и *16*, *17* заключены в кожухи, нижняя часть которых представляет собой масляные ванны для смазки пар.

На кронштейнах *9* натянуты два тросика аварийного останова вальцов *5*, соединенные с конечными выключателями. При нажатии на один из тросиков конечный выключатель дает команду на отключение электродвигателя и включение тормоза.

Принципиальная конструкция каландров во многом подобна конструкции вальцов. На рис. 9.13 показан разрез четырехвалкового Г-образного каландра. Станина представляет собой две рамы *5* замкнутого контура, имеющие Г-образные отверстия, в которых расположены корпусы подшипников валков. Подшипники среднего валка *2* укреплены на станине неподвижно. Подшипники верхнего *4* и нижнего *1* валков могут перемещаться в вертикальном направлении с помощью механизмов *6* и *11*. Подшипники выносного валка *7* перемещаются в горизонтальном направлении механизмами *9*.

Привод валков также осуществляется от электродвигателя через редуктор и установленные на валках зубчатые пары. В последнее время получили распространение каландры, у которых каждый валок соединен карданным валом с одним из выходных валов специального редуктора.

Все вспомогательные механизмы монтируются на рамах станины. На рис. 9.13 показаны питающее устройство *8*, прижимной валик *10* и направляющие валики *3*.

9.5.1. Валки

На рис. 9.14 показана конструкция валка каландра. Рабочую часть валка *А* часто называют *бочкой*, места *Б* под установку в подшипники — *шейками* или *цапфами*, место *В* под монтаж приводной шестерни или шпинделя — *хвостовиком*. Отношение диаметров шейки и бочки лежит в пределах 0,5—0,72.

Валки вальцов (за исключением рафинирующих) выполняют с цилиндрическими бочками. Бочки валков каландров часто имеют увеличивающийся к их середине диаметр (бомбировка валков); разность диаметров при этом не превышает 0,1—0,2 мм. Бомбировка в значительной степени компенсирует не-

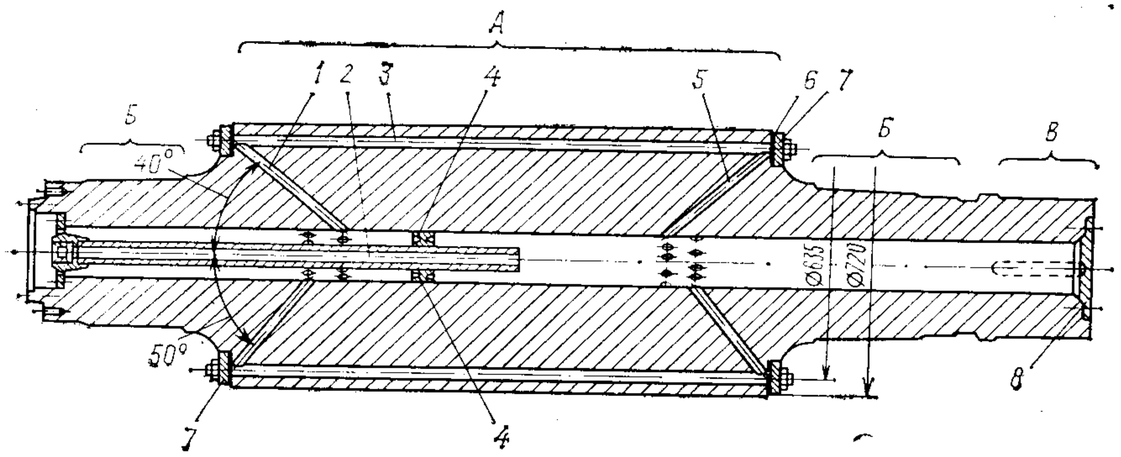


Рис. 9.14. Валок каландра:
1, 5 — наклонные подводящие отверстия; *2* — труба для подвода термостатирующей жидкости; *3* — рабочее отверстие; *4* — уплотняющее кольцо; *6* — прокладка; *7* — кольца; *8* — заглушка.

постоянство межвалкового зазора по длине валков, возникающее из-за их прогиба под действием распорного усилия.

Рабочие поверхности валков шлифуют, а у каландров — еще и тщательно полируют для получения листов и пленок с поверхностью высокого качества. С этой же целью к точности изготовления валков каландров предъявляются повышенные требования. Так, несоосность бочки и шеек, а также овальность бочки не должны превышать 0,005 мм.

Рабочая поверхность валка должна иметь повышенную твердость и износостойкость. Достигается это отливкой чугунных валков в комбинированные кокильные формы: часть формы, соответствующая бочке валка, выполняется из стали. Интенсивное охлаждение затвердевающего чугуна при контакте с высокотеплопроводной стальной стенкой формы способствует образованию поверхностного слоя валка толщиной до 15 мм, имеющего мелкокристаллическую структуру (отбеленный слой) с твердостью до HRC60.

Несмотря на этот прием изготовления валков поверхность их при работе изнашивается: ухудшается ее качество, появляются локальные вмятины. Ремонт валков заключается в их перешлифовке, а если дефекты глубокие, то и в переточке с последующей шлифовкой. Допустимое суммарное уменьшение диаметра бочки при ремонтах составляет 5—8%.

Внутренняя поверхность валков в области бочки (см. рис. 9.12) растачивается. Это увеличивает коэффициент теплоотдачи от металла к циркулирующей в полости охлаждающей воде. Тем не менее большая толщина стенки бочки является основной причиной плохого теплообмена между рабочей поверхностью и термостатирующей жидкостью. В связи с этим практически все каландры и многие типы вальцов оснащаются валками, конструкция которых приведена на рис. 9.14. Каналы для термостатирующей жидкости расположены в непосредст-

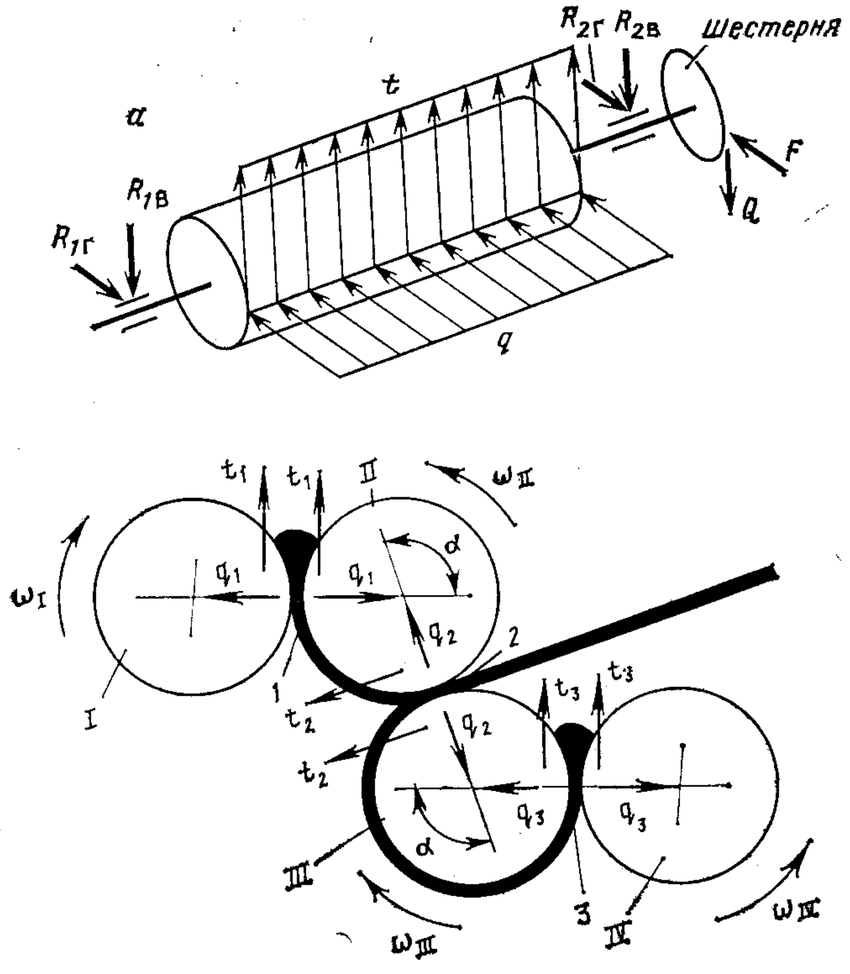


Рис. 9.15. Схема нагружения валков вальцов (*а*) и каландров (*б*). Пояснения в тексте.

венной близости от рабочей поверхности: расстояние до нее не превышает 40 мм. Это значительно уменьшает тепловую инерционность валка и интенсифицирует теплообмен.

Жидкость подается по трубе *2* в правую полость центрального отверстия валка. По наклонным каналам *5* она попадает в рабочие каналы *3*, выполненные вдоль образующих бочки, и затем по второй серии наклонных каналов *1* попадает в левую полость центрального отверстия, откуда выходит на слив. Левая и правая полости разделены кольцом *4* с уплотнениями. Рабочие каналы по торцам бочки закрыты кольцами *7* с прокладками *6*. Центральное отверстие валка имеет заглушку *8*.

Тепловой режим работы каландров в отличие от вальцов таков, что теплогенерация за счет деформирования материала в межвалковом зазоре оказывается недостаточной, чтобы поддерживать требуемую повышенную температуру рабочей поверхности валков. По этой причине жидкость, подаваемая в рабочие каналы валков, осуществляет не охлаждение, а подогрев. Если рабочая температура валков должна превышать 453—473 К, то целесообразно применение не жидкостного, а электрического

обогрева. В этом случае в рабочие каналы вставляются трубчатые электронагреватели омического сопротивления, а выводы от них через наклонные и центральное отверстия в валке соединяются с токосъемными кольцами, укрепленными на одном из концов валка. Вращающиеся при работе каландра кольца контактируют с токоподводящими щетками, установленными на станине.

Для контроля и регулирования температуры рабочей поверхности валка в нем параллельно какой-либо паре рабочих отверстий выполняют отверстия под термопару. Сигнал с установленной в отверстии термопары передается к регулирующему и регистрирующему прибору также через контактные кольца и щетки.

Валки вальцов и каландров рассчитывают на прочность с учетом действующих на них силовых факторов (рис. 9.15). Схема нагруженного состояния валков вальцов показана на рис. 9.15, *а*. На валки вальцов действуют: распределенные по рабочей поверхности валка распорное q и окружное t усилия, возникающие при силовом взаимодействии с обрабатываемым материалом; сосредоточенные на приводном конце валка окружное Q и радиальное F усилия, возникающие в зубчатом зацеплении привода валка; крутящий момент, создаваемый окружным усилием t, распределенным по рабочей поверхности; реакции в подшипниковых опорах валка R_1 и R_2, имеющие как горизонтальные ($R_{1г}$, $R_{2г}$), так и вертикальные ($R_{1в}$, $R_{2в}$) составляющие.

Если привод каждого валка во вращение независимый или осуществляется через шпиндель от блок-редуктора, то указанные сосредоточенные силы на конце валка отсутствуют; вместо них к концу валка прикладывается сосредоточенный крутящий момент.

Выражения для q и t следующие:

$$\text{а) } q = M/(RL); \qquad \text{б) } t = T/L \tag{9.37}$$

где R и L — радиус и длина валка соответственно; M и T — момент и распорное усилие на валке (см. разд. 9.4.3).

Схема нагруженного состояния валков каландров (рис. 9.15, *б*) более сложна, так как часть валков (валки *II, III*) участвует в образовании сразу двух межвалковых зазоров. Как видно из рис. 9.15, *б*, только валки *I* и *IV* нагружены аналогично тому, как показано на рис. 9.15, *а*. На валок же *II* действуют не только распределенные силы t_1 и q_1, возникающие в зазоре *1*, но и силы t_2 и q_2, действующие в зазоре *2*, причем направление действия этих сил на валок определяется взаимным расположением валков *I*, *II* и *III* (величиной угла α). Подобным же образом нагружен валок *III*.

Зазоры *1* и *3* не эквивалентны зазору *2* по величине возникающих в них распределенных сил, так как объем запаса в них различен. В зазоры *1* и *3* материал подается извне в виде узкой ленты; в зазор *2* материал поступает по всей ширине его в виде двух предварительно отформованных слоев. По этой причине величина запаса (значение ξ_1, см. разд. 9.4.3) и, следовательно, значения t и q в зазоре *2* меньше, чем в зазорах *1* и *3*.

При прочностном расчете валков следует иметь в виду, что они испытывают циклическое нагружение, поэтому в качестве прочностной характеристики материала (как правило, высокопрочного чугуна) следует пользоваться пределом усталостной прочности при симметричном цикле нагружения. Расчетный коэффициент запаса должен быть не меньше 2. При определении опасного сечения валка необходимо учитывать концентрацию напряжений в месте стыка бочки и цапфы.

В ряде случаев (например, при определении требуемой разности диаметров средней и краевой частей бочки, которая должна быть обеспечена при бомбировке) возникает необходимость расчета максимального прогиба валка, который имеет место в середине его рабочей части.

9.5.2. Подшипники валков

К подшипникам валков предъявляются следующие специфические требования: 1) большая несущая способность; 2) малые габариты; 3) малые потери на трение; 4) возможность небольших угловых смещений вала, работающего в подшипнике; 5) малый радиальный зазор.

Первое требование определяется тем, что подшипники нагружены большими радиальными усилиями; в некоторых машинах нагрузка на подшипник достигает 0,6 МН.

Второе требование обусловлено тем, что валки практически касаются друг друга, поэтому максимально возможный габаритный размер корпуса подшипника не может быть больше диаметра рабочей части валка.

Вследствие большой радиальной нагрузки в паре трения подшипника генерируется значительное количество тепла, эффективный отвод которого затруднен. Повышенная температура пары трения ухудшает условия ее смазки, поэтому удовлетворение третьего требования не только уменьшает потери энергии на трение, но и повышает долговечность подшипника.

При работе вальцов и каландров большие распорные усилия вызывают изгиб валков и как следствие — угловые смещения их осей в местах установки в подшипниках. Конструкция подшипника не должна препятствовать этим смещениям. В противном случае возникает повышенный износ подшипников и даже заклинивание в них валков. Этим и определяется четвертое требование.

Очевидно, что наличие радиального зазора в подшипниках определяет непостоянство межвалкового зазора как во времени при изменении нагрузок на валки, так и в данный момент времени по длине валка. Это ухудшает качество производимой на

каландрах продукции; поэтому понятна необходимость выполнения пятого требования.

В настоящее время эксплуатируются вальцы и каландры с подшипниками двух типов: скольжения и качения.

Подшипники скольжения обладают несомненными преимуществами с точки зрения удовлетворения первых двух требований. Однако угловые смещения вала допустимы в них лишь в пределах радиального зазора. Во избежание заклинивания радиальный зазор приходится выполнять столь большим, что это, во-первых, отрицательно сказывается на качестве продукции, а во-вторых, ухудшает условия смазки пары, повышая контактные давления в ней и вызывая повышенный расход смазки, которая легко вытекает из большого зазора. Однако непосредственное охлаждение поверхностей трения циркулирующей в зазоре смазкой неосуществимо, так как возможный расход ее через зазор с точки зрения интенсивности охлаждения ничтожен.

По изложенным выше соображениям новые конструкции машин оснащаются подшипниками качения. Для обеспечения первого и второго требований выбирают радиальные подшипники тяжелой серии (как правило, роликовые двухрядные); это сферические самоустанавливающиеся подшипники, допускающие значительные угловые смещения вала. Возможные радиальные смещения вала в этих подшипниках ничтожно малы по сравнению с таковыми в подшипниках скольжения.

Подшипники качения допускают возможность циркуляции смазки между телами трения с большим расходом, так что интенсивность их охлаждения смазкой также велика.

Из рассмотренного ясно, что в подшипники скольжения целесообразно подавать консистентную смазку. В подшипники качения принудительно и непрерывно подается насосом жидкая смазка. Сливаясь из подшипника, она охлаждается перед использованием в новом цикле.

На рис. 9.16 показана конструкция левого и правого (со стороны приводного конца валка) подшипников нижнего валка каландра. Внутренние кольца подшипников надеты на конические цапфы валка и поджимаются к нему с помощью фланца *1* через лабиринтное кольцо *2*, а также гайкой *10* через лабиринтное кольцо *9*. Гайка *10* навинчена на полукольца *11*, имеющие на наружной поверхности резьбу.

Жидкая смазка подается через верхние отверстия *3* в корпусах подшипников *4*. Омывая ролики и рабочие поверхности внутреннего и наружного колец подшипника, она свободно сливается через отверстия *12*. Лабиринтные уплотнения, образованные вращающимися *6*, *7* и неподвижными *5*, *8* кольцами, предотвращают вытекание масла из подшипниковых камер.

Подшипники вместе с валком перемещаются в пазах станины каландра в вертикальной плоскости. Наружная конфигурация корпусов подшипников прямоугольная; при этом на нижней боковой стороне корпуса выполнены полости *13*, в которых

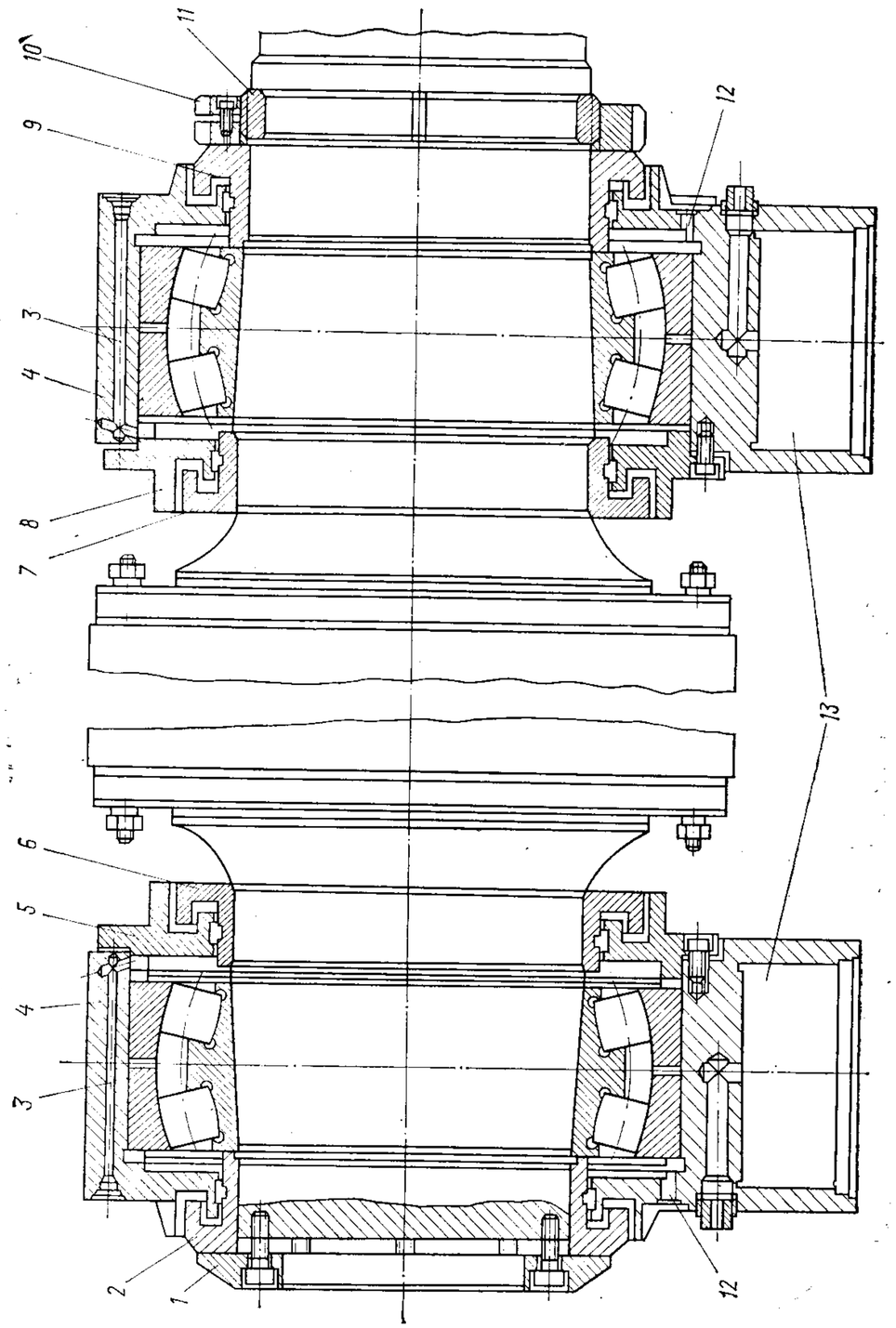


Рис. 9.16. Подшипники валков каландра:
1 — фланец; *2*, *6*, *7*, *9* — подвижные лабиринтные кольца; *3* — отверстия для подачи смазки; *4* — корпусы подшипников; *5*, *8* — неподвижные лабиринтные кольца; *10* — гайка; *11* — резьбовые полукольца; *12* — отверстие для слива смазки; *13* — полости в корпусах подшипников.

размещается часть деталей механизмов регулирования межвалкового зазора. Передняя и задняя боковые стороны корпуса скользят по направляющим планкам станины.

Расчет подшипников скольжения не имеет специфических особенностей. Для подшипников скольжения рассчитывается удельное давление p по формуле

$$p = R/(DL) \qquad (9.38)$$

где R — радиальная сила, действующая на подшипник; D и L — диаметр и длина рабочей поверхности подшипника.

Допустимое значение удельного давления при полужидкостном трении (периодической подаче консистентной смазки) пар сталь — чугун и сталь — бронза составляет 3 и 5 МПа соответственно. Подшипники скольжения проверяют также по характеристике pv.

Необходимость принудительного водяного или масляного охлаждения подшипника скольжения определяется при расчете удельной работы трения A:

$$A = pfv \qquad (9.39)$$

где f — коэффициент трения; v — скорость скольжения в паре трения.

Если значение A меньше 10^5 Н·м/(м²·с), то можно рассчитывать на естественное охлаждение подшипника.

9.5.3. Механизмы регулирования межвалкового зазора

На рис. 9.17 показаны кинематические схемы механизмов регулирования зазора у вальцов (*а*), Г-образного (*б*) и Z-образного (*в*) каландров.

Неподвижный подшипник *7* заднего валка вальцов (рис. 9.17, *а*) укреплен на стойке Н-образной станины *8*. Подвижный подшипник *6* переднего валка перемещается в направляющих, образованных перекладиной станины и траверсой *5*.

Основными элементами механизма являются нажимной винт *2* и укрепленная на стойке станины гайка *3*. К механизму относятся также упорный подшипник *4* и привод винта *1*. Вид привода зависит от типоразмера машины.

Необходимость в регулировании зазора возникает как перед пуском машины, так и при ее работе. В последнем случае при сближении валков приходится преодолевать сопротивление распорного усилия, поэтому крутящий момент, прикладываемый к винту для его вращения, значителен. Для вальцов малых типоразмеров (например, лабораторных) достаточным оказывается непосредственный ручной привод винта, для чего служит установленный на нем маховик *1*. У больших вальцов винт вращается электродвигателем или вручную (часто оба эти способа предусматриваются в одном механизме) через одноступенчатый червячный редуктор.

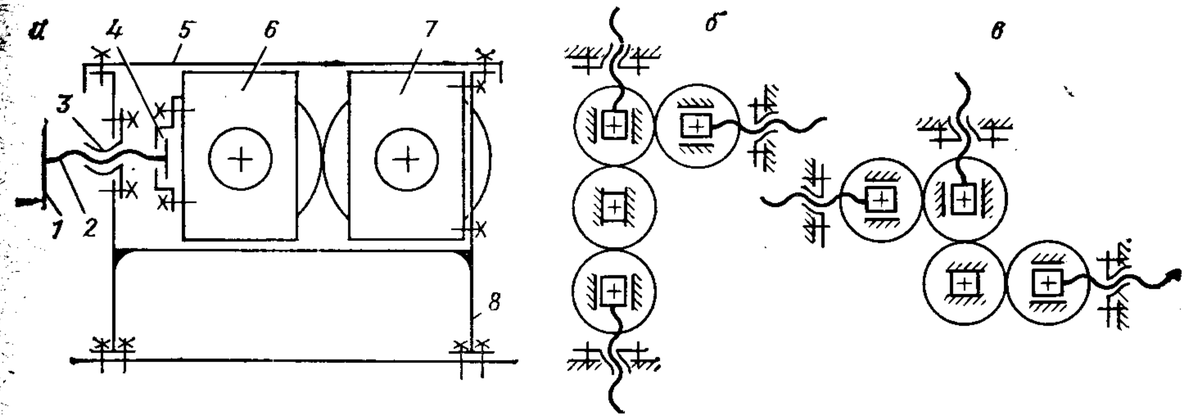


Рис. 9.17. Кинематические схемы механизмов регулирования зазора у вальцов (*а*). Г-образного (*б*) и Z-образного (*в*) каландров:
1 — привод винта; *2* — нажимной винт; *3* — гайка; *4* — упорный подшипник; *5* — траверса; *6* — подвижный подшипник переднего валка; *7* — неподвижный подшипник заднего валка; *8* — станина.

У каландров (рис. 9.17, *б, в*) между двигателем и винтом устанавливаются, как правило, двухступенчатые редукторы. Нужно отметить, что установка двухступенчатых (вместо одноступенчатых) редукторов в данном случае определяется не столько большим распорным усилием, сколько повышенными требованиями к точности регулирования зазора. Требуемая точность регулирования (±0,01 мм) может быть достигнута, если скорость перемещения подшипника не превышает 2—4 мм/мин. При частоте вращения двигателя 1000 об/мин это возможно при передаточном отношении редуктора около 2000. Наиболее компактным при таком передаточном отношении оказывается двухступенчатый червячный редуктор.

Конструкция механизма регулирования для верхнего валка Г-образного каландра показана на рис. 9.18. Электродвигатель *1* вращает соединенный с ним посредством муфты *2* червяк *3* первой ступени редуктора. С червяком в зацеплении находится колесо *4*, сидящее на валу *5*, который одновременно является червяком второй ступени, работающим в паре с колесом *6*. Это колесо при помощи шлицевого соединения *7* вращает нажимной винт *8*. Последний, ввинчиваясь в гайку *9*, смещается в осевом направлении, чему шлицевое соединение не препятствует. Валы первой ступени установлены в подшипниках качения. Вторая ступень достаточно тихоходна, поэтому ее можно оснастить подшипниками скольжения. Крайнее разведенное положение валков ограничено конечным выключателем *10*, на который нажимает упор, укрепленный на корпусе подшипника (на рис. 9.18 не показан). Срабатывая, конечный выключатель останавливает двигатель.

Конец нажимного винта (на рис. 9.18 не показан) соединяется с корпусом подшипника так, как это показано на рис. 9.19. В корпусе *1* выполнено отверстие *2*, в котором размещен упорный подшипник *3*. Усилие с нажимного винта *5* передается к подшипнику *3* и затем корпусу *1* через подпятник *4*.

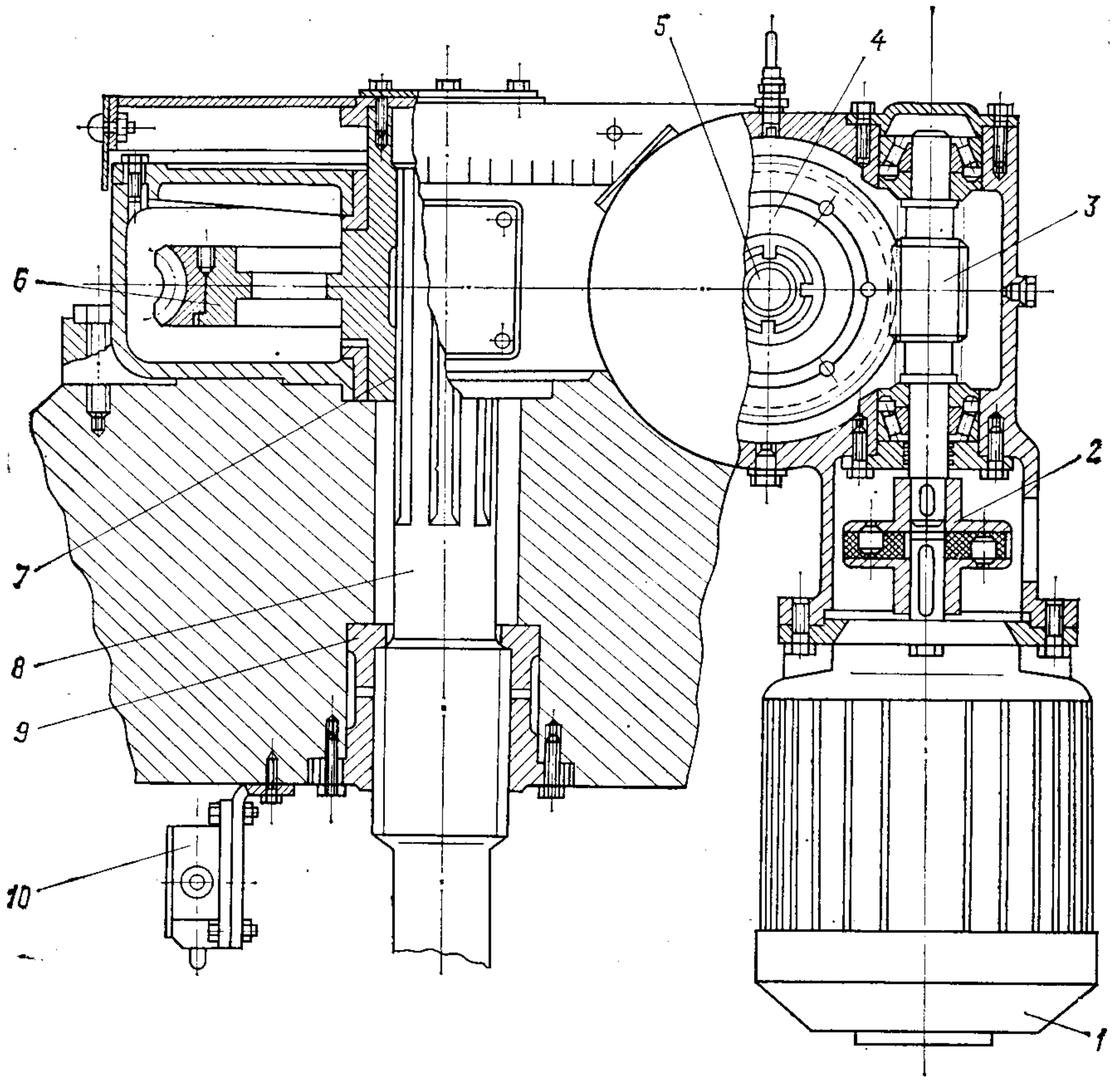


Рис. 9.18. Механизм регулирования межвалкового зазора каландра:
1 — электродвигатель; *2* — муфта; *3* — червяк; *4* — червячное колесо; *5* — вал; *6* — червячное колесо; *7* — шлицевое соединение; *8* — нажимной винт; *9* — гайка; *10* — конечный выключатель.

При регулировании зазора оба подшипника валка должны смещаться со строго одинаковыми скоростями, чтобы сохранить постоянство зазора по всей ширине валка. Несмотря на предусмотренную конструкцией вальцов и каландров одновременность включения и выключения двигателей механизмов перемещения этих подшипников, смещение их может быть различным из-за незначительной разности характеристик двигателей. Устраняется этот недостаток одним из двух способов: возможностью независимой ручной подстройки каждого из валков или установкой одного двигателя на оба механизма перемещения валка.

Мощность W электродвигателя привода механизма может быть рассчитана по следующей формуле:

$$W = (T/2)\, v\eta_1\eta_2\eta_2 \qquad (9.40)$$

где v — скорость перемещения подшипника; η_1, η_2 η_3 — коэффициенты полез-

ного действия подшипника-подпятника, винтовой пары и редуктора соответственно.

При прочностном расчете нажимного винта следует учитывать не только напряжения сжатия

$$\sigma_{сж} = (T/2)/(\pi d^2/4) \qquad (9.41)$$

(где d — диаметр винта в сечении $a-a$ — см. рис. 9.18), но и касательные напряжения, величина которых определяется крутящим моментом, равным

$$M = M_р + M_п + M_в \qquad (9.42)$$

где $M_р$ — момент, обеспечивающий перемещение подшипника валка против распорного усилия; $M_п$ — момент трения в подшипнике-подпятнике; $M_в$ — момент трения в винтовой паре.

Составляющие крутящего момента M равны

$$M_р = \frac{T}{2}\operatorname{tg}\alpha\frac{d_{ср}}{2}; \qquad M_п = \frac{T}{2}f_п\frac{d_п}{2}; \qquad M_в = \frac{T}{2}f_в\frac{d_{ср}}{2} \qquad (9.43)$$

где T — распорное усилие; α — угол подъема винтовой линии; $f_п$ и $f_в$ — коэффициент трения в подпятнике и винтовой паре соответственно; $d_{ср}$ — средний диаметр резьбы упорного винта; $d_п$ — средний диаметр дорожки тел качения в подпятнике.

Гайку нажимного винта проверяют на изгиб витков и смятие от действия распорного усилия.

Новые конструкции каландров часто оснащаются механизмами регулирования зазора гидравлического типа. Функцию нажимного винта в данном случае выполняет шток поршня гидроцилиндра двойного действия. Датчик расстояния между валками, установленный на их подшипниках, непрерывно подает сигнал о фактической величине зазора в электронный блок сравнения, где он сравнивается с заданной величиной, и если фактическая величина больше заданной, то из блока сравнения поступает команда на подачу масла в поршневую полость гидроцилиндра для сближения валков. Механизмы гидравлического типа, обеспечивая требуемую точность регулирования зазора. более компактны и обладают большим быстродействием.

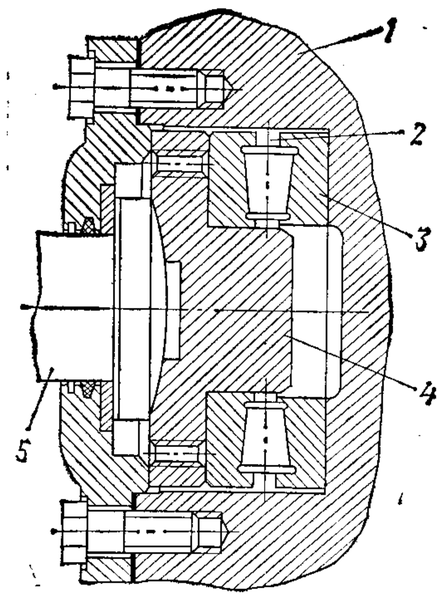


Рис. 9.19. Узел упорного подшипника механизма регулирования зазора:
1 — корпус подшипника валка; *2* — отверстие в корпусе подшипника; *3* — упорный подшипник; *4* — подпятник; *5* — нажимной винт.

9.5.4. Устройства для компенсации прогиба валков

На вальцах получают материал в виде листов для последующей обработки его в машинах, формующих изделия и полуфабрикаты, поэтому требования к толщине получаемого листа невысоки. Для получения же каландрованного листа нужного качества, представляющего собой уже готовое изделие или часть его, одна только высокая точность регулирования зазора оказывается недостаточной. Средняя часть листа получается более толстой, что объясняется прогибом валков под воздействием распорного усилия, приводящим к увеличению межвалкового зазора в середине его. Прогиб может достигать нескольких десятых долей миллиметра, в то время как требуемая точность поддержания толщины каландруемой пленки часто составляет $\pm 0{,}025$ мм. В связи с этим в каландрах применяются различные конструктивные приемы, направленные на поддержание постоянства толщины листа по его ширине.

Одним из таких приемов является *бомбировка валков*. Рассмотрим этот прием на примере трехвалкового каландра. Вследствие действия распорных усилий T_1 и T_2, возникающих в зазорах *1* и *2*, валки *I*, *II* и *III* прогибаются так, как это показано на рис. 9.20. Валок *II* имеет прогиб как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, причем эти прогибы не равны, так как не равны распорные усилия T_1 и T_2. В зазор *2* входит предварительно сформованный лист и подвергается в нем лишь окончательной калибровке, поэтому величина запаса и, следовательно, распорное усилие в этом зазоре меньше, чем в зазоре *1*.

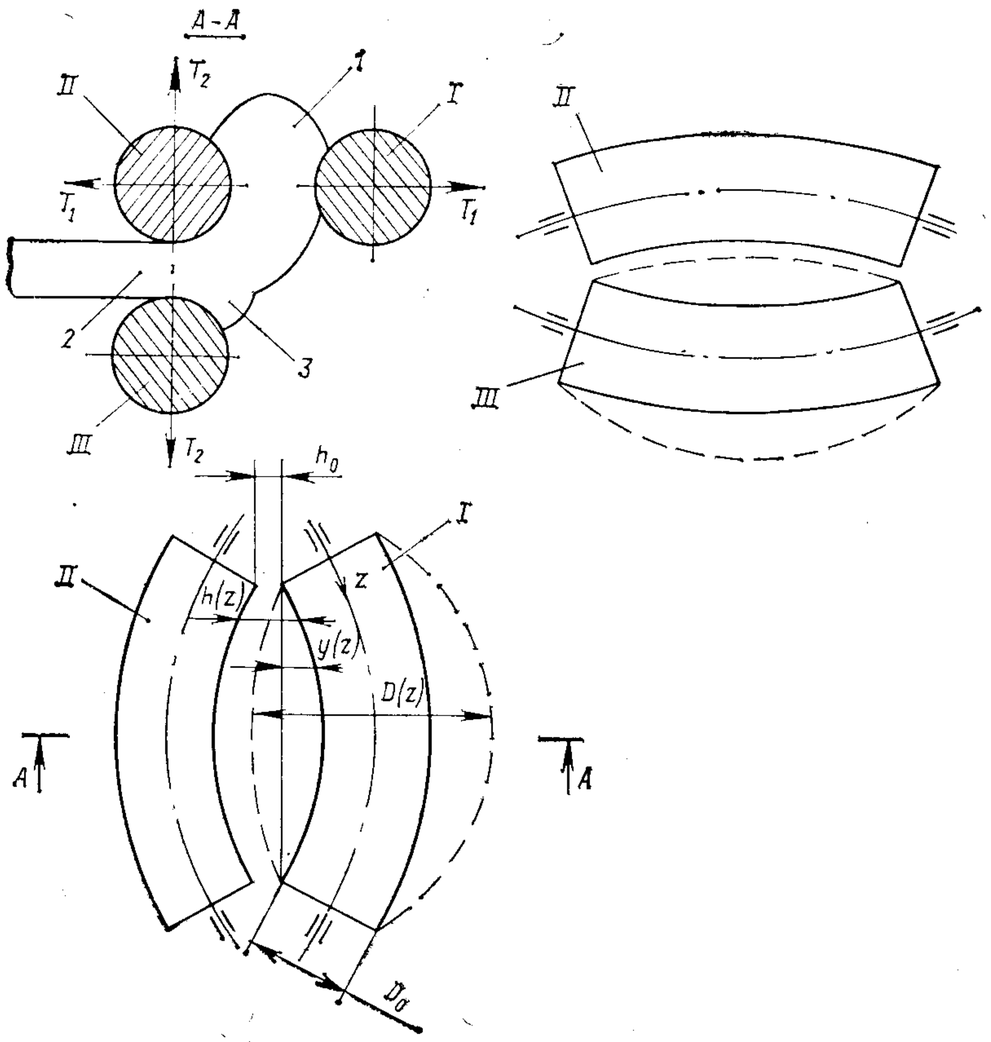


Рис. 9.20. Схема прогиба валков трехвалкового каландра. Пояснения в тексте.

Вследствие прогиба валков *I* и *II* выходящий из зазора *1* и поступающий в зазор *2* слой материала имеет утолщение в средней части. По этой причине величина образующегося перед зазором *2* запаса *3* также больше в средней части его. Таким образом, средняя часть выходящего из каландра листа *4* оказывается более толстой, чем краевые его части, по двум причинам: прогиб валков *II* и *III*, вызывающий увеличение средней части зазора *2*; бóльшая величина запаса *3* на входе в среднюю часть зазора *2*.

Таким образом, ясно, что только лишь выравнивание зазора *2* еще не обеспечивает получения равнотолщинного листа. Необходимо также и выравнивание зазора *1*. Обратимся к зазору *1*, образованному валками *I* и *II* (см. рис. 9.20). Величина зазора h зависит от координаты z и равна сумме начальной величины его h_0 (до прогиба в процессе работы) и прогибов y валков *I* и *II*, которые в свою очередь зависят от координаты z. Так как размеры валков и, следовательно, их жесткости и прогибы равны, то выражение для $h(z)$ принимает следующий вид:

$$h(z) = h_0 + 2y(z) \tag{9.44}$$

Из рисунка ясно, что зазор при работе каландра можно сохранить постоянным по величине и равным h_0, если диаметр D валка *I* выполнить переменным по координате z (показано штриховой линией) и равным

$$D(z) = D_0 + 2y(z) \tag{9.45}$$

Если рассматривать валок как балку круглого сечения, имеющую шарнирные опоры по концам рабочей части и нагруженную равномерно распределенной поперечной силой T/L, то прогиб ее $y(z)$ описывается следующим выражением:

$$y(z) = \frac{T}{12EI}\left(\frac{z^4}{2L} + \frac{L^2 z}{2} - z^3\right) \tag{9.46}$$

где E — модуль упругости при растяжении; I — момент инерции; L — длина рабочей части валка.

Аналогичным образом можно выровнять зазор *2*, выполнив валок *III* бочкообразным. Валок *II* участвует в образовании обоих зазоров и имеет прогибы как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. Прогибы эти различны по величине,

поэтому полное выравнивание зазоров бомбировкой валка *II* невозможно.

Способ выравнивания зазоров бомбировкой валков имеет ряд недостатков.

В Г-образных трехвалковых и Z-образных четырехвалковых каландрах (см., например, рис. 9.5, *а, д*) прогиб валков под воздействием распорного усилия в одном из зазоров практически не влияет на величину другого, соседнего зазора, поэтому предсказание требуемой величины бомбировки валков возможно изложенным выше способом. При расположении же трех и более валков в одной плоскости (см. рис. 9.5, *б, в*) или с углами между линиями центров, не равными 90° (см. рис. 9.5, *е*), распорное усилие в одном из зазоров вызывает искажение не только этого, но и соседних с ним зазоров. В связи с этим прогноз требуемой бомбировки представляет собой сложную задачу.

Второй недостаток заключается в том, что величина бомбировки валков не может быть регулируемым параметром. Прогиб, определяющий требуемое значение бомбировки, пропорционален распорному усилию T, которое, как это видно из формулы (9.23), зависит от вязкости материала η, скорости вращения валков U, величины запаса $\xi_н$ и устанавливаемого зазора h_0. Изменение любого из этих параметров, неизбежное в связи с тем, что каландр является универсальной машиной, предназначенной для производства различных изделий, вызывает изменение прогиба валков. Поэтому бомбировка валков может быть использована лишь для частичной компенсации увеличения зазора за счет их прогиба. В современных конструкциях каландров бомбировка применяется в сочетании с другими приемами компенсации прогиба валков.

Вторым приемом компенсации прогиба валков является их *контризгиб* (рис. 9.21). Сущность приема заключается в том, что валок помимо основных, опорных подшипников *1* оснащается дополнительными подшипниками *2*, к которым приложены силы F, вызывающие изгибающий момент и прогиб валка, противоположные по знаку таковым от распределенной нагрузки T/L.

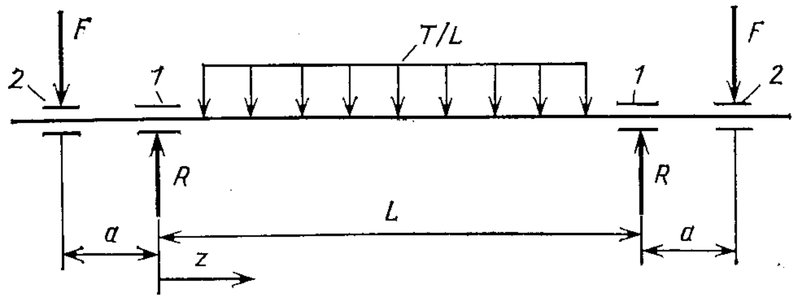


Рис. 9.21. Схема сил, действующих на валок при его контризгибе.

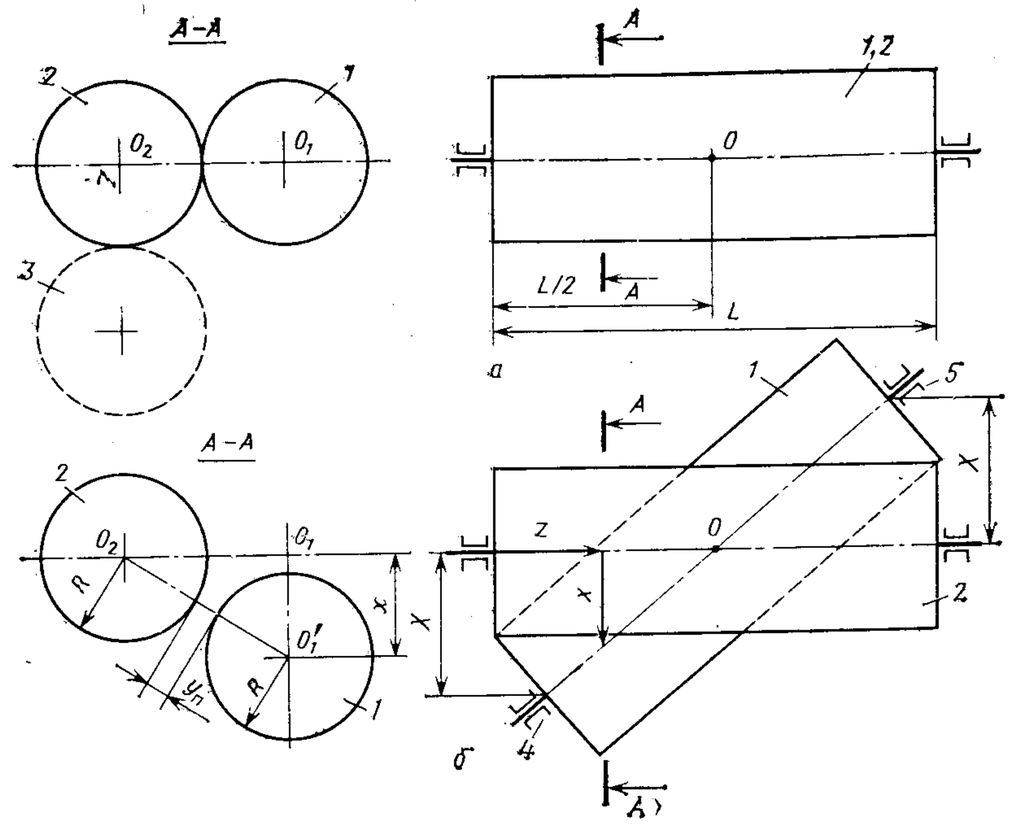


Рис. 9.22. Схема перекрещивания (перекоса) валков. Пояснения в тексте.

Функция прогиба валка $y_к(z)$ под действием сил F при отсутствии рабочей нагрузки T/L имеет вид

$$y_к(z) = [Fa/(2EI)](z^2 - Lz) \qquad (9.47)$$

Как видно из уравнений (9.46) и (9.47), функции прогиба от рабочей нагрузки $y(z)$ и от сил контризгиба $y_к(z)$ не идентичны, поэтому идеальное выравнивание зазора с помощью контризгиба невозможно.

Значения требуемой силы F и расстояния a, достаточные для полной компенсации прогиба валка, например, в центре его можно определить, приравняв $y_к(z)$ к $y(z)$ при $z = L/2$. Рассчитанная таким образом сила F может значительно превосходить само распорное усилие T. Конструкция механизма контризгиба при этом оказывается слишком металлоемкой и громоздкой, а потери энергии на трение в ней — весьма значительными. По этой причине контризгиб как самостоятельный прием компенсации прогиба не применяют, а используют его в сочетании с бомбировкой. Бомбировку выполняют из расчета минимально возможного значения распорного усилия $T_{мин}$. Возникающая же при работе каландра нескомпенсированная часть прогиба от разности сил $T—T_{мин}$ (где T — распорное усилие, фактически действующее при данном режиме каландрования) устраняется с помощью контризгиба валков.

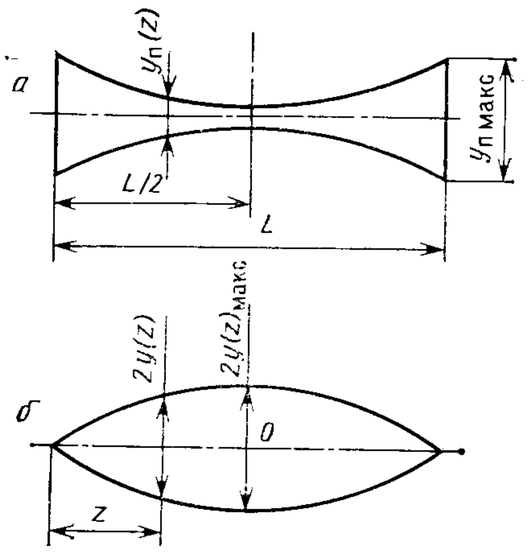


Рис. 9.23. Вид функций $y_п(z)$ (*а*) и $2y(z)$ (*б*).

В современных конструкциях вместо бомбировки и контризгиба применяется также прием *перекрещивания (перекоса) валков* (рис. 9.22). Рассмотрим этот прием на примере двух расположенных в горизонтальной плоскости валков *1* и *2* трехвалкового Г-образного каландра.

Если валки приблизить друг к другу до касания, то они займут положение, показанное на рис. 9.22, *а*. Если затем валок *1* повернуть в вертикальной плоскости относительно горизонтальной оси *О*, проходящей через середину рабочей части валков, то он займет положение относительно валка *2*, показанное на рис. 9.22, *б*. Касание валков сохранится при этом только в одной точке, расположенной на оси поворота *О*. Во всех других местах по длине рабочей части образуется зазор между валками $y_п$ тем больший, чем больше смещение x центра сечения O_1' валка *1* от первоначального положения O_1. Смещение x связано с координатой положения сечения z следующим соотношением:

$$x = (2X/L)\,(z - L/2) \qquad (9.48)$$

где X — смещение краевых сечений рабочей части валка, практически равное смещениям подшипников *4* и *5*.

Для треугольника $O_2O_1O_1'$ справедливо соотношение

$$(O_1'O_2)^2 = (O_2O_1)^2 + (O_1O_1')^2, \quad \text{или} \quad (2R + y_п)^2 = (2R)^2 + x^2 \qquad (9.49)$$

откуда

$$4R^2 + 4Ry_п + y_п^2 = 4R^2 + x^2 \qquad (9.50)$$

Зазор $y_п$ — величина малого порядка по отношению к R и x, поэтому пренебрегая в (9.50) слагаемым $y^2_п$, получаем

$$y_п = (4R)^{-1}\,x^2 \qquad (9.51)$$

Вводя выражение (9.48) в (9.51), находим функцию распределения зазора $y_п$ по длине рабочей части валков:

$$y_п(z) = (4R)^{-1}\,(2X/L)^2\,(z - L/2)^2 \qquad (9.52)$$

Вид этой функции показан на рис. 9.23, *а*.

Распределение добавки к зазору $2y$, возникающей вследствие прогиба валков, соответствующее формуле (9.46), показано на рис. 9.23, *б*. Полная величина зазора h при работе каландра

с перекосом валков равна

$$h = h_0 + 2y(z) + y_п(z) \qquad (9.53)$$

где h_0 — зазор между валками до их перекоса и подачи материала.

Для обеспечения постоянства зазора h по длине рабочей части валков z необходимо соблюдение условия

$$2y(z) + y_п(z) = \text{const} \qquad (9.54)$$

Сравнивая (9.46) и (9.52), видим, что строго это условие не

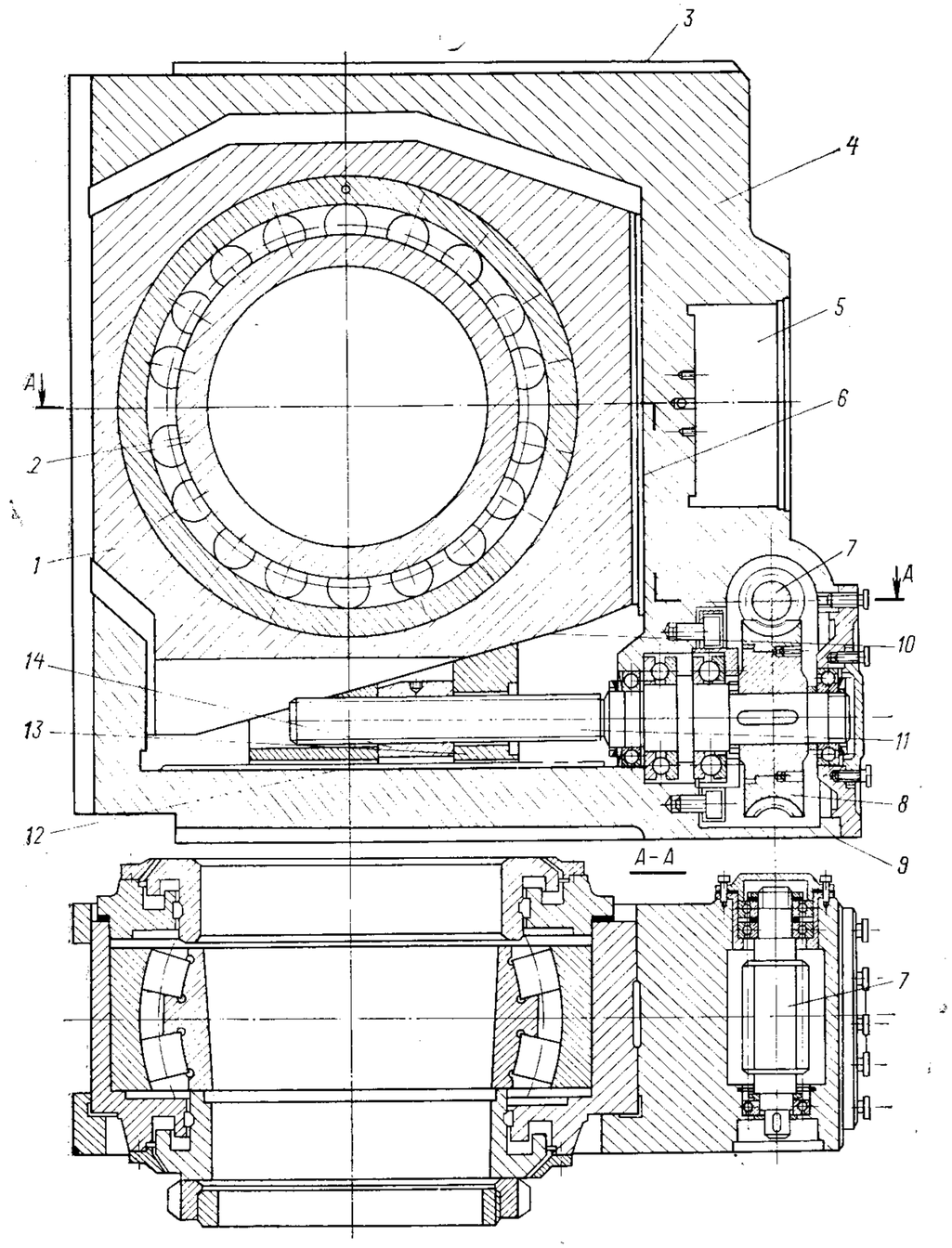


Рис. 9.24. Подшипник валка каландра с механизмом перекоса:

1 — вкладыш; *2* — подшипник; *3, 6, 9, 10, 12* — поверхности скольжения; *4* — корпус подшипника; *5* — отверстие для расположения упорного подшипника; *7* — червяк; *8* — червячное колесо; *11* — ходовой винт; *13* — клиновой ползун; *14* — гайка.

может быть соблюдено, однако можно добиться, чтобы значения этой суммы были равны по крайней мере в двух точках по длине рабочей части: посередине и по краям ее (см. рис. 9.23):

$$2y(z)\Big|_{z=L/2} + y_{\text{п}}(z)\Big|_{z=L/2} = 2y(z)\Big|_{\substack{z=0\\z=L}} + y_{\text{п}}(z)\Big|_{\substack{z=0\\z=L}} \qquad (9.55)$$

Вводя в условие (9.55) выражения (9.46) и (9.52) для $y(z)$ и $y_{\text{п}}(z)$ соответственно, получаем

$$5TL^3/(192EI) + 0 = 0 + X^2/(4R) \qquad (9.55а)$$

Воспользовавшись выражением (9.55а), можно рассчитать величину X, на которую нужно сместить подшипники *4* и *5* валка *1* (см. рис. 9.22, *б*), чтобы значения зазора в середине и по краям валка были равны.

На рис. 9.24, *а* показан подшипник выносного валка Г-образного каландра, оснащенный механизмом перекоса. Корпус *4* имеет отверстие *5*, в котором размещен подпятник механизма регулирования зазора. При регулировании зазора корпус *4* смещается в горизонтальном направлении, скользя при этом по направляющим станины поверхностями *3* и *9*.

Перекос валка (поворот его в вертикальной плоскости) осуществляется смещением подшипника в вертикальном направлении: клиновой ползун *13* с укрепленной в нем гайкой *14* перемещается в горизонтальном направлении вращающимся ходовым винтом *11*, скользя при этом по поверхности *12* корпуса и наклонной поверхности *10* вкладыша *1*. Вкладыш вместе с подшипником *2* перемещается при этом в вертикальном направлении, скользя по поверхности корпуса *6*.

Ходовой винт приводится во вращение червячной парой *7* и *8*. Червяки *7* механизмов перекоса обоих подшипников валка имеют единый привод от электродвигателя, так что смещение подшипников происходит одновременно. Ходовой винт одного из механизмов имеет правую нарезку, а другого — левую, поэтому вертикальные смещения подшипников и концов валка противоположны по направлению. Максимально возможные смещения достигают 20—40 мм. Эти значения оказываются достаточными, чтобы скомпенсировать прогиб валков, который в средней их части может достигать 0,1—0,2 мм.

9.5.5. Привод валков

Вращение валкам *1* и *2* вальцов (рис. 9.25) передается от электродвигателя *8* через коническо-цилиндрический редуктор *9* и зубчатую пару *5*, *10*. С неподвижного заднего валка *1* вращение передается переднему, смещаемому валку *2* через пару шестерен *4*, *3*. Фрикция валков (обусловленная неодинаковостью частот их вращения и окружных скоростей) обеспечивается тем,

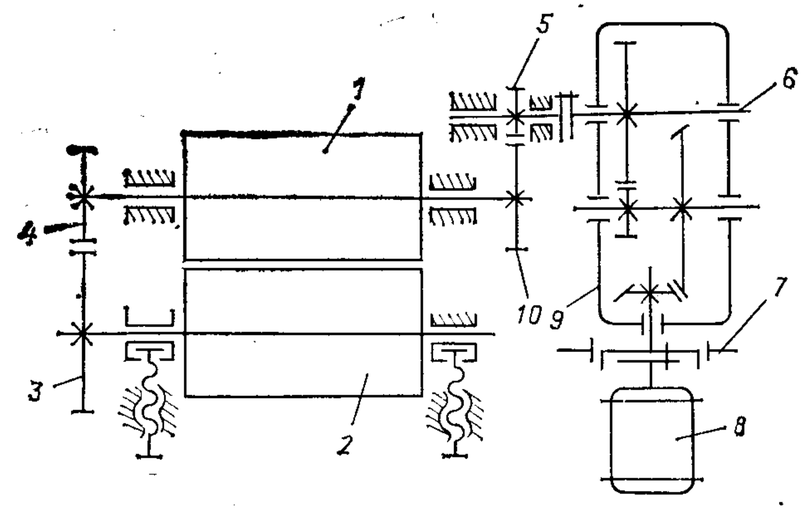


Рис. 9.25. Кинематическая схема привода валков вальцов:
1, *2* — валки; *3*, *4*, *5*, *10* — зубчатые пары; *6* — выходной вал редуктора; *7* — тормоз; *8* — электродвигатель; *9* — редуктор.

что число зубьев этих шестерен различно (меньшее у шестерни *4*); такие шестерни называются *фрикционными*.

Все вальцы оснащаются колодочным или ленточным тормозом *7*.

Привод вальцов может быть *индивидуальным*, как это показано на рис. 9.25, и *групповым*. Например, к второму концу выходного вала *6* редуктора *9* могут быть присоединены вторые вальцы. Существуют группы из трех вальцов с общим приводом.

В зависимости от расположения привода по отношению к рабочему месту вальцы бывают с *левым* и *правым* приводами (на рис. 9.25 — правый привод).

В начале цикла обработки материала на вальцах (например, при подогреве материала при приготовлении резиновых смесей) потребляемая мощность в 1,5—2 раза превышает ее среднее значение за цикл. Это следует учитывать при выборе типа электродвигателя. На вальцах чаще всего устанавливают асинхронные двигатели переменного тока.

К приводу каландров предъявляются более разносторонние требования, чем к приводу вальцов. Во-первых, привод должен обеспечивать плавный вывод валков с малой скорости вращения (3—6 м/мин), при которой производятся заправка ткани или корда и другие подсобные операции, связанные с пуском каландра в работу, на рабочую скорость. Во-вторых, он должен с высокой стабильностью поддерживать рабочую скорость валков, которая в зависимости от выполняемой операции может лежать в диапазоне от 50 до 120 м/мин. В-третьих, привод, так же как и у вальцов, должен выдерживать кратковременные перегрузки до 300%. В-четвертых, привод должен обеспечивать требуемое значение коэффициента фрикции для каждой пары валков.

Первое, второе и третье требования удовлетворяются при использовании электродвигателей постоянного тока с шунтовой обмоткой, допускающих регулирование частоты вращения в диапазоне 1 : 10. Эти двигатели могут использоваться также и для электродинамического торможения каландра при его останове, так что необходимость тормоза в этом случае отпадает.

На четвертом требовании нужно остановиться более подробно. Необходимое значение коэффициента фрикции для каждой пары валков определяется процессом, который реализуется в зазоре между этими валками. Например, на рис. 9.4, *г* показано, как выполняется двухсторонняя обкладка ткани. В зазоры между первым (считая сверху) и вторым, а также между третьим и четвертым валками подается извне лента резиновой смеси. Здесь, циркулируя в относительно большом запасе, она должна окончательно прогреться. Эти процессы протекают с достаточной интенсивностью, если коэффициент фрикции равен 1 : 1,5—1 : 1,4. Вместе с тем такое значение его существенно не ухудшает предварительной калибровки выходящих из этих зазоров слоев резиновой смеси.

В зазоре между вторым и третьим валками осуществляется обкладка ткани. Хорошее качество поверхности полуфабриката получается только при коэффициенте фрикции, равном 1 : 1.

На рис. 9.4, *б* показана промазка ткани. В зазоре между первым и вторым валками протекают те же процессы, что и в предыдущем случае. В зазоре между вторым и третьим валками окончательно калибруется слой резины, идущий на промазку; оптимальный для окончательной калибровки коэффициент фрикции — 1 : 1, т. е. такой же, как и в предшествующем процессе для этих валков. В последнем зазоре происходит промазка. Интенсивное втирание резиновой смеси в поры ткани возможно, если коэффициент фрикции составляет не менее 1 : 1,3—1 : 1,4. Как видно, в этом и в описываемом выше случаях требуемые значения коэффициента фрикции для последней пары валков также одинаковы.

На рис. 9.4, *е* показано листование резиновой смеси. Во втором (сверху) и третьем зазорах коэффициент фрикции по условиям точности калибровки и качества поверхности полуфабриката должен быть равен 1 : 1, т. е. для третьего зазора это значение не совпадает со значениями, необходимыми в предыдущих случаях.

Таким образом, если привод каландра не позволяет изменять коэффициенты фрикции у каждой пары валков, то на таких каландрах возможно выполнение ограниченного числа операций. Каландры с таким приводом, как правило, выпускают специализированными. Привод универсальных каландров должен обеспечивать возможность бесступенчатого и независимого регулирования коэффициента фрикции для каждой пары валков.

Ранние конструкции каландров имели привод, подобный приводу вальцов (см. рис. 9.15). Каждая пара валков имела свою пару фрикционных шестерен. Этот тип привода, даже если он оснащен двигателем постоянного тока, имеет следующие недостатки: постоянство коэффициента фрикции у каждой пары валков; действие радиальных сил на концах валков, несущих фрикционные шестерни; ограниченная возможность регулирования межвалкового зазора; невозможность использования приема перекоса валков.

На последних трех недостатках следует остановиться более подробно.

В зацеплении фрикционных шестерен возникают силы, передающиеся на шейку валка и вносящие свой вклад в его прогиб. На шейку другого конца валка действуют другие по величине силы; несимметричность нагружения валка вызывает неконтролируемый перекос его в пределах зазоров соединений. Как несимметричный прогиб валка, так и перекос его искажают межвалковый зазор.

При увеличении зазора изменяется межцентровое расстояние фрикционной пары шестерен. Чтобы шестерни при этом не выходили из зацепления, их выполняют с большим модулем и корригированными. Изготовление корригированных колес более сложно; увеличение же модуля при сохранении неизменными диаметров колес ухудшает плавность их хода. Последний недостаток в значительной степени компенсируется тем, что зацепление выполняют косозубым, а чтобы при этом на валках не возникали осевые усилия, устанавливают шевронные пары шестерен.

Различные кинематические схемы привода валков, свободные от этого недостатка, приведены на рис. 9.26. Во втором, более совершенном типе привода, показанном на рис. 9.26, *а*, фрикционные шестерни размещены не на валках *1*, а в корпусе редуктора *4*. Каждому валку соответствует свой выходной

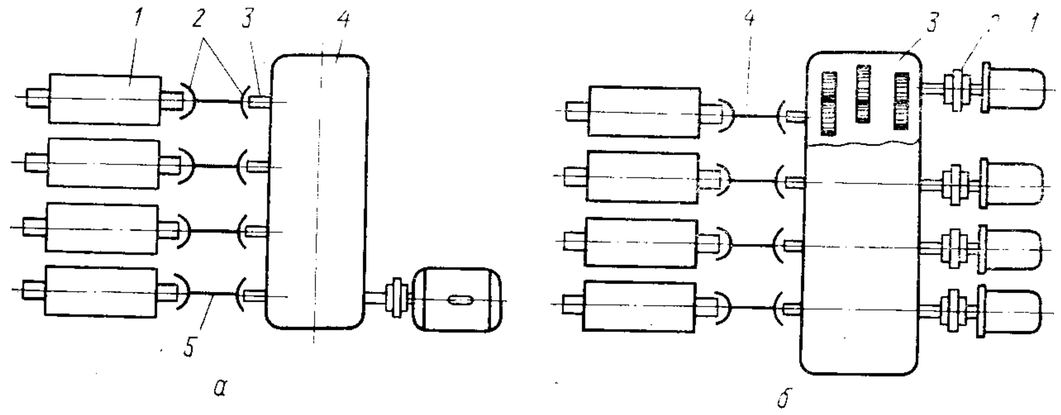


Рис. 9.26. Кинематические схемы привода каландров:
а — привод валков от одного электродвигателя (*1* — валок; *2* — шарниры Гука; *3* — выходной вал редуктора; *4* — редуктор; *5* — шпиндель); *б* — независимый привод валков (*1* — электродвигатель; *2* — муфта; *3* — редуктор; *4* — шпиндель).

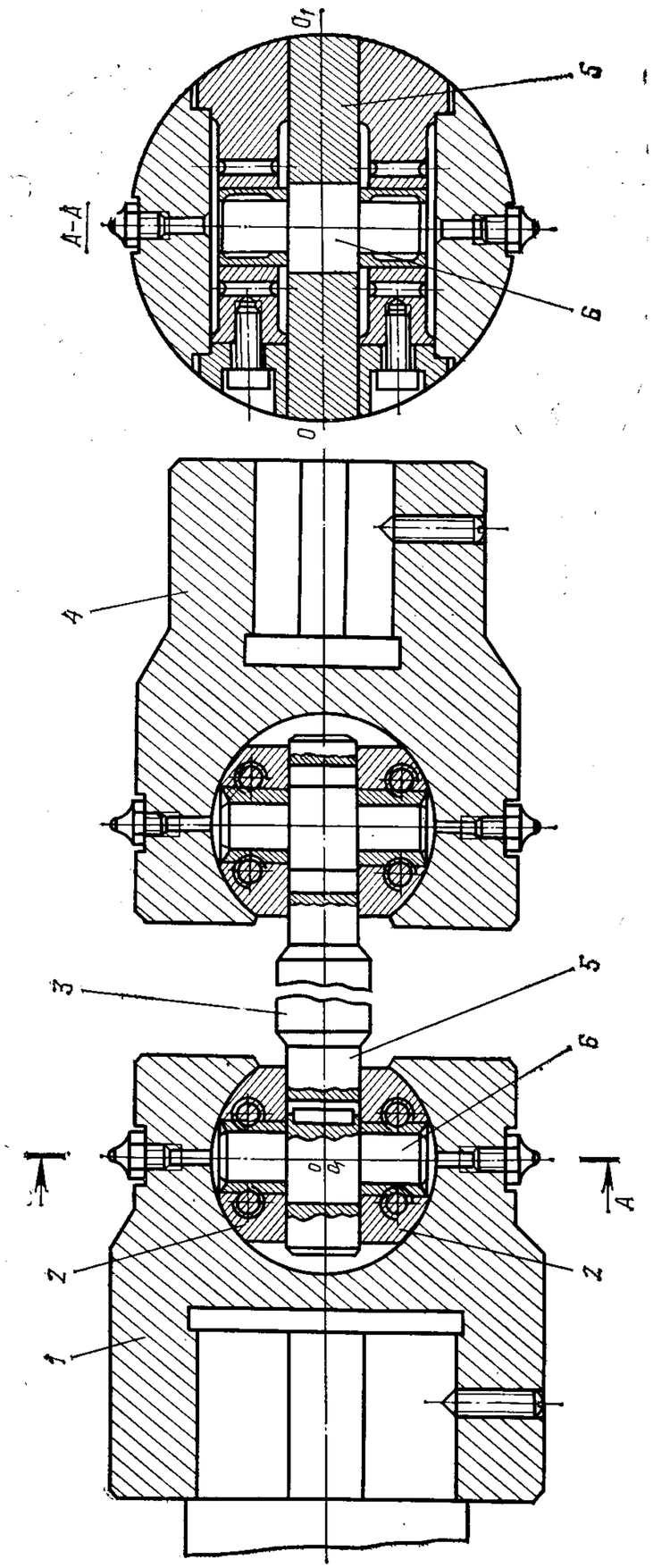


Рис. 9.27. Шарнирный шпиндель привода валка:
1, 4 — муфты; *2* — вкладыш; *3* — шпиндель; *5* — лопасти; *6* — ось.

вал *3* редуктора. Выходные валы соединены с валками шпинделями *5*, имеющими по два шарнира Гука *2*. При этом типе привода валки не воспринимают сил, возникающих в зацеплении фрикционных шестерен; на них передается со шпинделя только крутящий момент. Шарниры шпинделей допускают значительные радиальные (до 30 мм) и угловые (до 10°) смещения валков относительно выходных валов редуктора, что позволяет регулировать зазор и осуществлять перекос валков в требуемых по условиям технологии пределах. Однако один из упомянутых недостатков присущ и этому типу привода: постоянство коэффициентов фрикции.

Схема привода валков универсальных каландров показана на рис. 9.26, *б*. Каждый валок имеет независимый привод, включающий в себя электродвигатель *1*, муфту *2*, редуктор *3* и шпиндель *4*. Все редукторы кинематически независимы друг от друга, но имеют общий корпус. Регулирование коэффициентов фрикции осуществляется изменением частоты вращения двигателей.

Конструкция шпинделя привода валков показана на рис. 9.27. Левая муфта *1* надевается на конец валка, правая *4* — на выходной вал редуктора. В цилиндрической расточке каждой из полумуфт установлены шарниры. Тело шпинделя *3* цилиндрическое, а концы его выполнены в виде плоских лопастей *5*. В лопасти выполнено отверстие, в которое вставлена ось *6*. На оба конца оси надеты вкладыши *2*. Лопасть шпинделя может проворачиваться относительно вкладышей вокруг оси *6*, а вкладыши в сборе с осью и шпинделем могут вращаться относительно муфты вокруг оси OO_1. В правой лопасти отверстие для оси овальное, поэтому расстояние между осями шарниров может изменяться в пределах овальности отверстия.

9.5.6. Станины

Станина — наиболее металлоемкая часть машины. Масса станины каландров может достигать 50 т. При конструировании станины следует стремиться к уменьшению ее массы.

Деформации станины под воздействием рабочих усилий, передаваемых на нее с валков через подшипники, вносят свой вклад в искажение межвалковых зазоров. Это искажение для вальцов, как уже отмечалось, практически не влияет на качество обработанного на них материала, поэтому требования к жесткости станины вальцов невысоки. Фактором, лимитирующим уменьшение массы станин вальцов, является их прочность, а не жесткость. У каландров же прогибы станины, непосредственно влияющие на изменение рабочих зазоров, не должны превышать точности регулирования и поддержания постоянства зазоров. По этой причине, как правило, станины вальцов рассчитываются, исходя из условия прочности, а каландров — из условия требуемой жесткости.

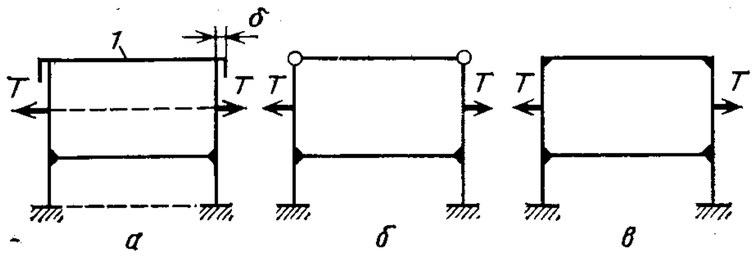


Рис. 9.28. Расчетные схемы различных конструкций станин вальцов. Пояснения в тексте.

При выполнении указанных расчетов станины рассматривают как статически неопределимые рамы с жесткими или шарнирными соединениями элементов.

Для станины вальцов в зависимости от их конструкции возможны три расчетные схемы (рис. 9.28). Вариант «*а*» соответствует конструкции со съемной, накладной траверсой *1*. Зазор δ между траверсой и стойкой рамы не препятствует прогибу стойки под действием распорного усилия *T*; наличием траверсы при расчете рамы в этом случае пренебрегают. Если накладная траверса выполнена таким образом, что зазор равен нулю, то принимают расчетную схему по варианту «*б*». Вариант «*в*» соответствует траверсе, выполненной за одно целое со станиной.

Станины первых двух типов, показанные на рис. 9.28, называют открытыми, третьего типа — закрытыми. Валки при ремонте вынимаются из закрытой станины сбоку, для чего необходимы специальные монтажные площадки сбоку вальцов; технология монтажа в этом случае более сложна. Современные конструкции вальцов, выпускаемых отечественной промышленностью, имеют только открытые станины.

Стойки и перекладины станин, а также траверсы выполняют чаще всего двухтаврового сечения (реже — коробчатого). Толщина стенок сечений может быть от 15 до 35 мм в зависимости от типоразмера машины.

С целью повышения долговечности станин все поверхности трения их с соседними деталями и сборочными единицами стремятся выполнить в съемных элементах. Так, в месте трения о станину упорного винта механизма регулирования зазора вводят сменную втулку *9* (см. рис. 9.29). В местах трения корпусов подшипников при регулировании межвалкового зазора на станины устанавливают сменные накладки.

9.5.7. Предохранительные и аварийные устройства

Важными задачами при конструировании валковых машин являются обеспечение безопасной работы на них и предотвращение поломок машин при неверных действиях обслуживающего персонала.

В соответствии с требованиями техники безопасности оператор валковой машины должен иметь возможность остановить ее, находясь в любой точке зоны ее обслуживания. При этом максимально допустимая длина дуги проворота валка за время от подачи оператором сигнала на останов машины до полного фактического останова ее не должна превышать 250—450 мм (в зависимости от типоразмера машины).

Механизмы останова представляют собой штанги или тросики, протянутые вдоль валков с обеих сторон машины на расстоянии 300—400 мм от них и соединенные с конечными выключателями. Достаточно легкого нажатия на штангу или тросик, чтобы конечный выключатель сработал, включив тормоз и одновременно отключив электродвигатель. Тормоза ленточного или колодочного типа устанавливаются в кинематической цепи привода, как правило, сразу после электродвигателя. При электродинамическом торможении сигнал конечного выключателя переключает цепи электродвигателя таким образом, что на его якоре создается момент, направленный против вращения.

Механизмы регулирования зазора и перекрещивания валков оснащаются конечными выключателями, срабатывающими при достижении корпусом подшипника в процессе его перемещения одного из крайних положений. Конечный выключатель в этом случае останавливает привод соответствующего механизма.

Момент сопротивления вращению валков может по разным причинам превысить предельное значение. Это может произой-

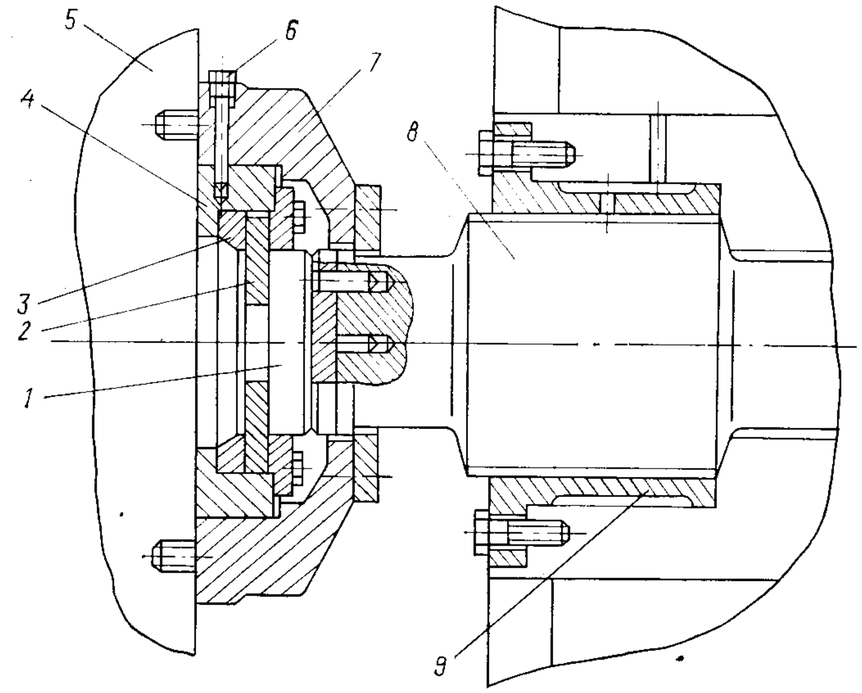


Рис. 9.29. Предохранительная шайба корпуса подшипника валка вальцов:
1 — пуансон-подпятник; *2* — предохранительная шайба; *3* — опорная шайба; *4* — кассета; *5* — корпус подшипника валка; *6* — винт; *7* — корпус кассеты; *8* — нажимной винт; *9* — гайка.

ти, например, при недопустимом уменьшении зазора на начальной стадии вальцевания еще холодной высоковязкой смеси, при попадании крупных твердых включений в межвалковый зазор и т. д. Для предотвращения порчи элементов привода и рабочей поверхности валков применяют специальные защитные детали. При возрастании нагрузки выше допустимой они разрушаются, приостанавливая при этом работу машины.

Такая защитная деталь — предохранительная шайба — показана на рис. 9.29. Распорное усилие с корпуса *5* подшипника валка передается нажимному винту *8* механизма регулирования зазора через кассету *4*, опорную *3* и предохранительную *2* шайбы, пуансон-подпятник *1*. Как только распорное усилие превышает допустимую величину, происходит срез шайбы *2* по поверхности, соответствующей диаметру пуансона *1;* подшипник с валком при этом отходит вправо, зазор между валками возрастает, распорное усилие и момент сопротивления вращению уменьшаются практически до нуля. Для замены срезанной шайбы достаточно вывинтить винт *6* и вынуть кассету *4* вместе с шайбой из корпуса *7* в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа.

9.6. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

9.6.1. Ограничительные стрелы и ножи для обрезания кромок

Ограничительные стрелы предотвращают выход материала за пределы рабочей части валков и попадание его в подшипники. В каландрах они выполняют еще одну функцию: ограничивают пребывание материала на части рабочей длины валков, соответствующей требуемой ширине формуемого листового материала.

Ограничительные стрелы каландра показаны на рис. 9.30. Рабочий орган каждой стрелы состоит из двух взаимно перекрывающихся пластин *7* и *8*, торцевыми поверхностями плотно прилегающих к валкам. Продолжением детали *8* является наконечник *9*, входящий в межвалковый зазор. Пластины подвижно сочленены с держателем *1* соединением типа «ласточкин хвост» и могут вертикально смещаться для устранения зазора между ними и валком ходовыми винтами *5* и *6*.

Каждый держатель *1* может вместе с пластинами смещаться вдоль валков, скользя при этом по полой направляющей штанге *3*. Смещение выполняют вручную, вращая ходовой винт *4* рукояткой *2*; при этом вдоль по винту *4* перемещается гайка-сухарь *10*, которая своим язычком *10′*, проходящим через прорезь в штанге *3*, соединена с держателем *1*. Штанги *3* своими фланцами укреплены на левой и правой половинах станины. У вальцов регулирование расстояния между стрелами не требуется, поэтому держатели *1* укрепляются неподвижно непосредственно на корпусах подшипников валков.

Ножи срезают материал с рабочей поверхности валка в виде одной или нескольких полос заданной ширины, а также отре-

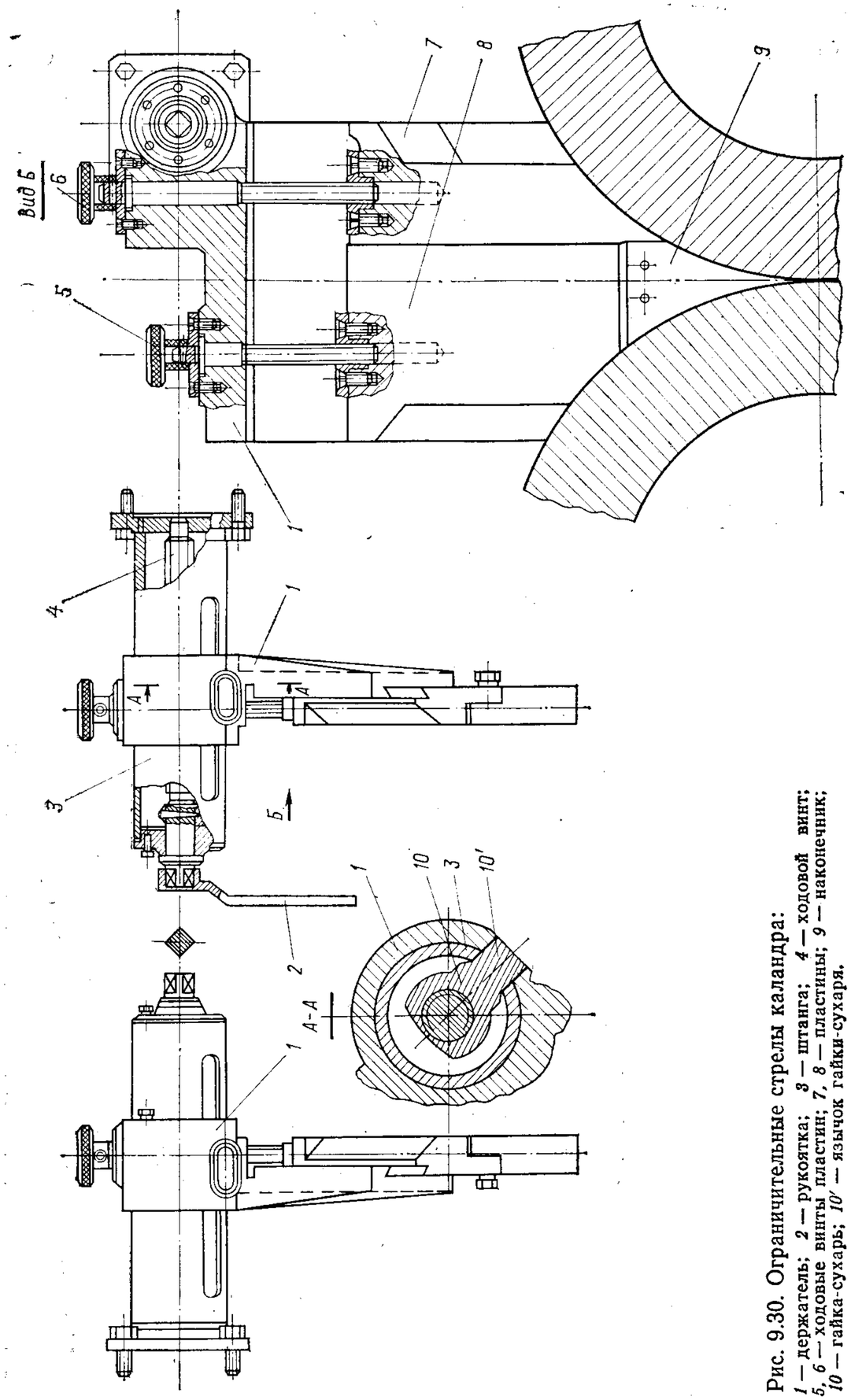


Рис. 9.30. Ограничительные стрелы каландра:
1 — держатель; *2* — рукоятка; *3* — штанга; *4* — ходовой винт; *5, 6* — ходовые винты пластин; *7, 8* — пластины; *9* — наконечник; *10* — гайка-сухарь; *10′* — язычок гайки-сухаря.

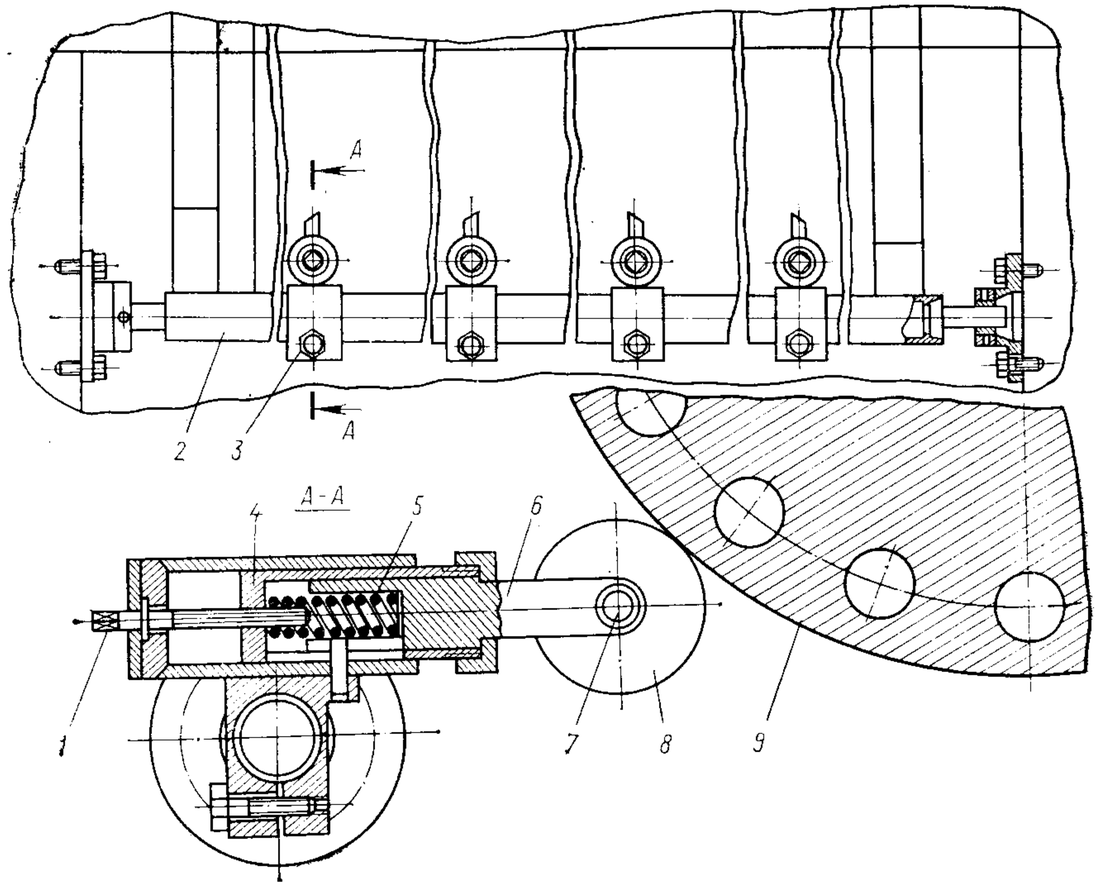


Рис. 9.31. Ножи каландра:
1, 3 — винты; *2* — штанга; *4* — обойма; *5* — пружина; *6* — держатель; *7* — ось; *8* — нож; *9* — валок.

зают боковые кромки листа, равняя тем самым его края. Отрезанная кромочная лента вновь подается в запас питающей пары валков.

Типовая конструкция ножей показана на рис. 9.31. Каждый из четырех ножей может смещаться вдоль штанги *2* и укрепляться на ней с помощью винта *3*. Нож *8* подвижно надет на ось *7*, укрепленную в держателе *6*. Держатель же подвижно вставлен в обойму *4* и подпружинен в ней. Положение обоймы *4* относительно валка *9* регулируется винтом *1*. Прижим ножа к валку может осуществляться не только пружиной *5*, но и пневмоцилиндром. Для облегчения разрезания ножи иногда оснащают электрообогревом.

На питательно-подогревающих вальцах, с которых резиновая смесь снимается непрерывно в виде узкой ленты, устанавливается нож подобной конструкции.

9.6.2. Перемешивающие и возвратные устройства

Для интенсификации смешения на вальцах используют различные приемы. Об одном из них — подрезании с поворотом слоя — упоминалось ранее. Механический нож для выполнения этой

операции установлен на суппорте, который с помощью ходового винта может перемещаться вдоль валка. Прижим ножа к валку и отвод от него осуществляется пневмоцилиндром двойного действия, также укрепленным на суппорте.

Для возврата материала, не прилипшего к валкам и провалившегося в пространство под ними, используют различные устройства, обязательным элементом которых является транспортер. Схема одного из таких устройств показана на рис. 9.3.

9.6.3. Питающие и приемные устройства

Материал подается на вальцы в виде порошка (термореактивные композиции или композиции на основе поливинилхлорида), гранулята (термопласты) или целым куском массой до 10—15 кг. Крупные куски подаются в межвалковый зазор транспортером или вручную. Для непрерывной подачи порошка и гранулята вальцы оснащаются бункерами-питателями, по конструкции такими же, как у червячных машин.

Каландры, как правило, питают непрерывной подогретой лентой материала, снимаемой с вальцов или поступающей из червячной машины. Если ленту подавать в одно место запаса перед межвалковым зазором, то величина запаса будет неодинаковой по длине рабочей части валков. Толщина же выходящего из зазора листа зависит от величины запаса, т. е. лист будет получаться разнотолщинным. Во избежание этого недостатка ленту необходимо равномерно распределять по всей рабочей длине валков.

Одна из конструкций питателей, осуществляющих равномерное распределение ленты, показана на рис. 9.32. Основной деталью этого механизма является вал *3*, вращающийся в подшипниках *10*, установленных на левой и правой стойках станины. Ось вала параллельна осям валков. На валу имеется замкнутая винтовая канавка. Вдоль по валу может перемещаться суппорт *4*. К суппорту винтом *5* прикреплена вилка *9*, на концах которой установлена ось *6* с вращающимся на ней в подшипниках *8* роликом *7*. Ролик направляет ленту материала, подаваемую в запас питающей пары валков каландра.

Суппорт находится в зацеплении с винтовой канавкой с помощью прямоугольного сухаря, который может, скользя по канавке, поворачиваться, если это необходимо, вокруг оси *11*. При вращении вала сухарь скользит по ветви канавки, например, с правым заходом и заставляет перемещаться суппорт вправо. В конце этой ветви винтовая канавка монотонно переходит в кольцевую и затем в винтовую, но уже с левым заходом. Придя сюда, суппорт останавливается на время, пока сухарь скользит по кольцевой части, а затем начинает движение в обратном направлении вплоть до другой, левой кольцевой части канавки.

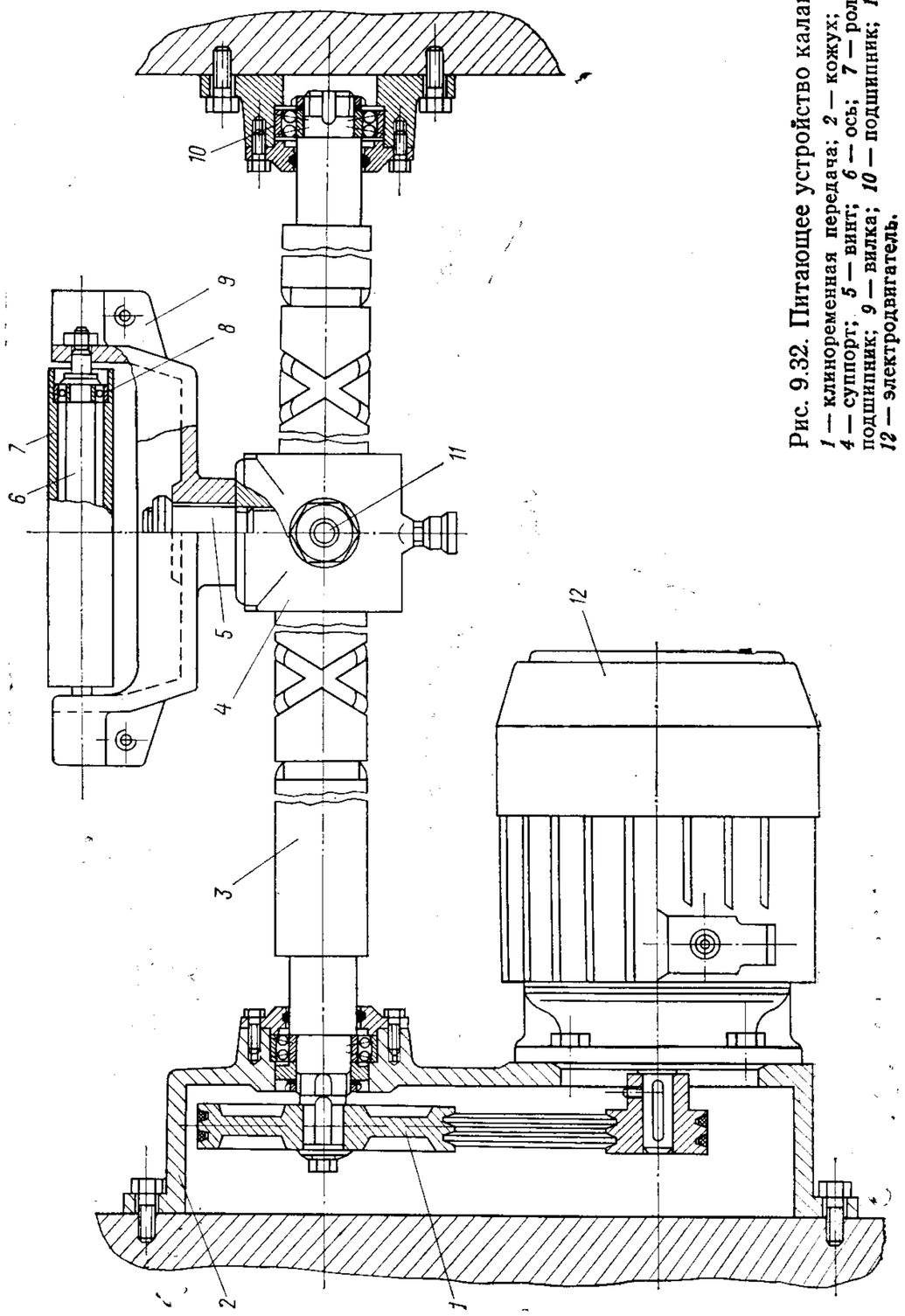


Рис. 9.32. Питающее устройство каландра:
1 — клиноременная передача; *2* — кожух; *3* — вал; *4* — суппорт; *5* — винт; *6* — ось; *7* — ролик; *8* — подшипник; *9* — вилка; *10* — подшипник; *11* — ось; *12* — электродвигатель.

Своим осциллирующим движением ролик *7* равномерно распределяет ленту по длине запаса. Вал приводится во вращение электродвигателем *12* через клиноременную передачу *1*.

К питающим устройствам относятся также раскаточные механизмы. На них устанавливаются шпули с рулонами прокладочной ткани, а также тканей, бумаги или других рулонных материалов, на которые при каландровании наносится слой резиновой смеси или пластмассы. Эти механизмы могут крепиться непосредственно на каландре или устанавливаться рядом с ним. Конструктивно они представляют собой два расположенных напротив друг друга шпинделя, установленных на подшипниковых опорах. На концах шпинделей имеются быстроразъемные зажимы, в которые своими концами устанавливается шпуля. Один из шпинделей имеет ленточный или дисковый тормоз, создающий необходимое натяжение разматываемого материала. Величина натяжения регулируется изменением момента торможения.

Приемные устройства вальцов — это преимущественно ленточные транспортеры, подающие провальцованный материал на последующую обработку (охлаждение, дробление, экструзию, каландрование и т. д.). Приемные устройства каландров более разнообразны как по назначению, так и по конструкции.

Готовое изделие или полуфабрикат, сошедшие с каландра, закатываются в рулон. Однако предварительно его нужно охладить и принять меры против слипания слоев в рулоне. Слипание предотвращают, вводя при намотке слой прокладочной ткани или покрывая поверхности листа тальком либо мелом. В соответствии с этим к приемным устройствам относятся: охлаждающие ленточные транспортеры или холодильные барабаны (валки); пудрильные механизмы или ванны с масляной эмульсией; намоточные (закаточные) устройства.

Один из вариантов компоновки этих устройств показан на рис. 9.33. Материал с каландра поступает на холодильные валки *1* и затем на ленточный транспортер *9*, в начале которого установлено пудрильное устройство *2*.

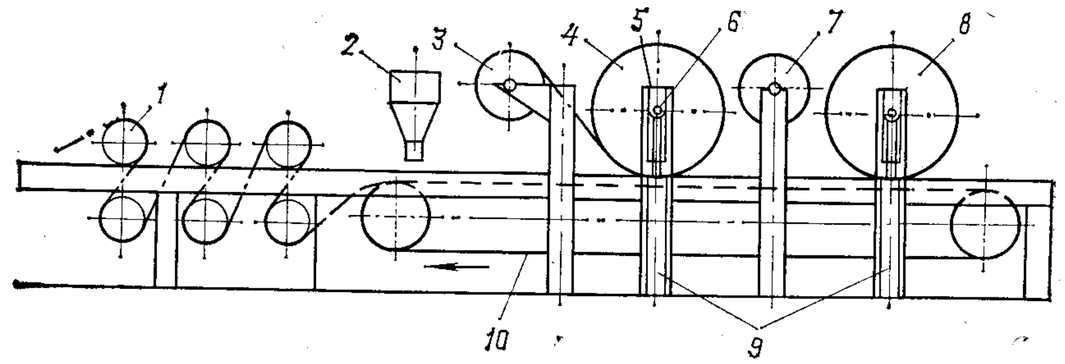


Рис. 9.33. Приемные устройства каландра:
1 — холодильные валки; *2* — опудривающее устройство; *3, 7* — рулоны прокладочного материала; *4, 8* — намоточные (закатывающие) устройства; *5* — направляющая стойка; *6* — узел подшипника; *9* — пневмоцилиндры; *10* — транспортер.

Намоточное (закаточное) устройство *4* представляет собой шпулю, концы которой установлены в шпинделях с подшипниковыми узлами *6*. Эти узлы могут свободно перемещаться в вертикальном направлении по направляющим стойкам *5*. При установке новой шпули в шпиндели она под действием собственного веса ложится на движущийся транспортер и начинает вращаться. Поступающий к ней на транспортере материал закатывается на нее вручную на 2—3 оборота. Дальнейшая намотка осуществляется самопроизвольно за счет вращения шпули. По мере увеличения диаметра наматываемого рулона подшипники *6* поднимаются вверх. По достижении требуемого диаметра рулона пневмоцилиндры *9* своими штоками поднимают опоры подшипников *6* с рулоном в крайнее верхнее положение, и рулон цеховыми грузоподъемными механизмами снимается с опор.

Достоинство этого механизма — простота (отсутствие собственного привода), недостаток — возрастающая по мере намотки сила прижима рулона к транспортеру. Максимально возможная масса рулона в данном случае ограничена не условиями его

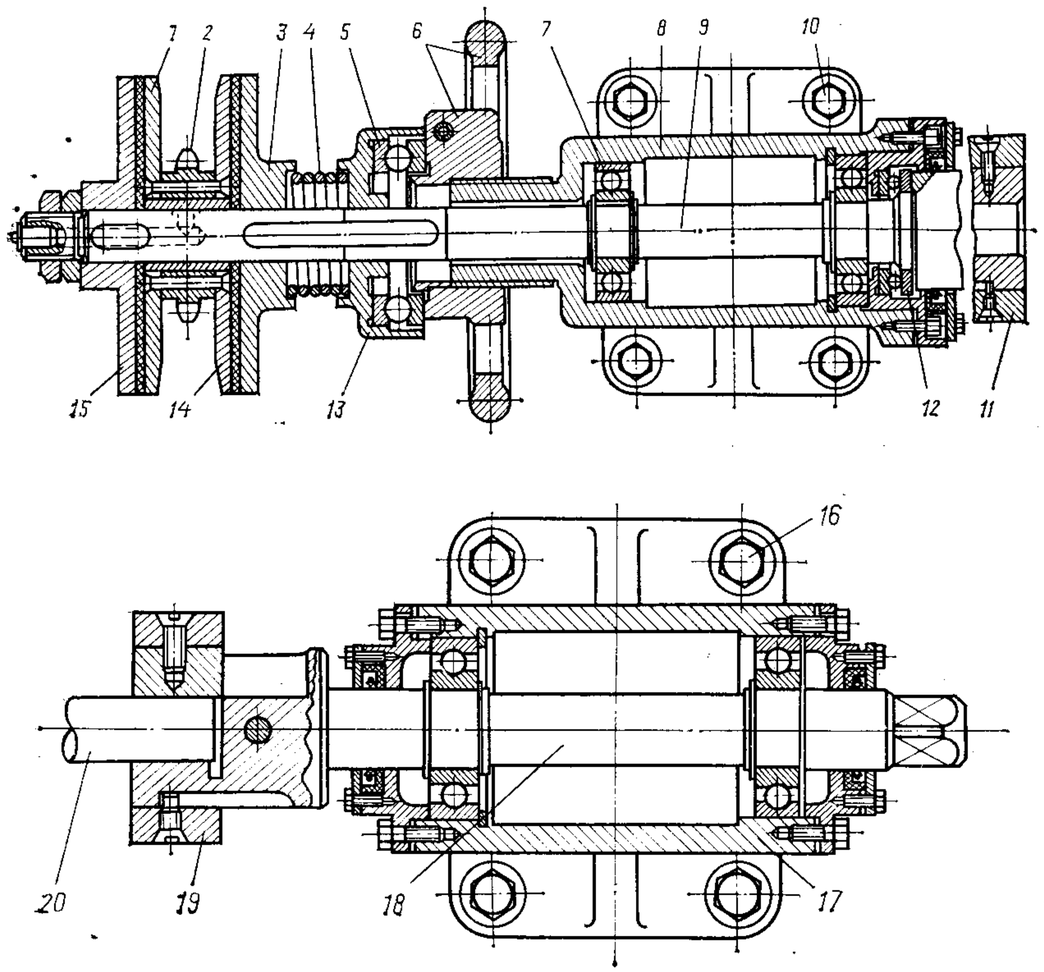


Рис. 9.34. Закаточное устройство каландра:

1, 14 — фрикционные диски; *2* — звездочка; *3, 15* — прижимные диски; *4* — пружина; *5, 12* — упорные подшипники; *6* — гайка-штурвал; *7* — подшипник; *8, 17* — корпусы шпинделей; *9, 18* — шпиндели; *10, 16* — винты; *11, 19* — кольца; *13* — корпус упорного подшипника; *20* — шпуля.

транспортирования и последующей обработки, а началом слипания слоев.

Этого недостатка лишена конструкция устройства, показанная на рис. 9.34. Корпусы левого *8* и правого *17* шпинделей укреплены соосно болтами *10* и *16* на левой и правой половинах станины каландра соответственно. Собственно шпиндели *9* и *18* могут вращаться в подшипниках *7*. При установке шпули кольцо *19* отводится в правое положение и конец шпули *20* заводится сверху вниз в открывшийся в шпинделе паз; затем кольцо *19* переводится в левое положение и фиксирует конец шпули. Другой конец шпули вставляется в левый шпиндель *9* аналогично с помощью кольца *11*. Шпуля вращается левым шпинделем *9*, приводимым цепной передачей через звездочку *2*.

По мере намотки диаметр рулона возрастает, линейная же скорость подачи материала на рулон остается постоянной, поэтому угловая скорость шпули и шпинделя должна уменьшаться. Если электропривод может обеспечить только постоянную частоту вращения звездочки *2*, то ее соединяют со шпинделем при помощи фрикционной муфты. На рис. 9.34 фрикционная муфта включает в себя жестко связанные со звездочкой фрикционные диски *1* и *14* (они могут свободно проворачиваться вокруг шпинделя), прижимные диски *3* и *15* с накладками, вращающиеся заодно со шпинделем, и устройство прижима дисков друг к другу, состоящее из пружины *4*, упорных подшипников *5*, *12* и гайки-маховика *6*. Участвуя в передаче крутящего момента от звездочки к шпуле, диски *1*, *14* и *3*, *15* могут проскальзывать друг относительно друга, допуская при этом замедление вращения шпинделя.

Устройство прижима позволяет регулировать усилие натяжения наматываемого листа. Свинчивая или навинчивая гайку *6* на корпус *8*, можно изменять расстояние между деталями *3* и *13* и тем самым изменять усилие затяжки пружины, обеспечивающее прижатие дисков. Сила трения между проскальзывающими дисками изменяется, за счет чего изменяются передаваемый на шпулю крутящий момент и сила натяжения листа.

ГЛАВА 10

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕЗИНОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ШИН

Резиновая промышленность включает ряд различных производств, из которых важнейшими являются получение резиновых технических изделий (РТИ) и шин. Выпуск этих видов продукции состоит в реализации некоторых общих процессов резинового производства, а также ряда технологических операций, специфичных для каждого вида изделий. К общим процессам

резинового производства относятся: приготовление резиновых смесей и полуфабрикатов, формование резиновых смесей, сборка резиновых изделий и их вулканизация.

Приготовление резиновых смесей — наиболее ответственный и наиболее трудоемкий процесс резинового производства. Для изготовления резиновых изделий с заданными эксплуатационными свойствами каучуки смешивают с различными ингредиентами, вводимыми в смесь в определенном массовом соотношении и в определенной последовательности. В зависимости от назначения ингредиенты резиновой смеси подразделяются на следующие группы: вулканизующие вещества, ускорители вулканизации, активаторы, активные и неактивные наполнители, пластификаторы (мягчители), противостарители, красители и т. д. Качество резиновой смеси зависит от равномерности распределения в ней компонентов и определяется ее способностью перерабатываться без преждевременной вулканизации.

Приготовление полуфабрикатов состоит в получении резиновых или резинотканевых заготовок для последующих процессов формования и вулканизации. Заготовки изготавливают методами шприцевания на червячных машинах, вальцевания и каландрования с последующей резкой на полуфабрикаты определенной массы и размеров на специальных станках и приспособлениях.

Формование изделий из резиновых смесей основано на способности материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, к необратимому деформированию под действием внешней нагрузки. Основная масса формовых изделий производится методами прессования и литья под давлением. Для получения профильных, пленочных и рукавных изделий используются методы шприцевания и каландрования.

Сборка шин и РТИ из предварительно заготовленных деталей состоит в наложении заготовок друг на друга, склеивании, дублировании и прикатке до получения сырых изделий для последующей вулканизации.

Вулканизация сырых изделий, совмещаемая в большинстве случаев с их формованием, заключается в придании изделиям формоустойчивости и требуемых эксплуатационных свойств путем проведения в них химической реакции вулканизации (сшивания). Вулканизационное оборудование обеспечивает вулканизацию изделий при нагреве в периодическом или непрерывном режиме работы.

Ниже рассмотрены различные виды основного оборудования, применяемого на отдельных стадиях технологического процесса производства шин и РТИ: резиносмесители, сборочные станки, оборудование для формования и вулканизации покрышек пневматических шин, вулканизационное оборудование для РТИ. Остальные виды резиноперерабатывающего оборудования — червячные и литьевые машины, прессы, вальцы и каландры — рассмотрены ранее в соответствующих разделах книги.

10.1. РЕЗИНОСМЕСИТЕЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Смешение каучука с другими компонентами резиновой смеси может производиться периодическим или непрерывным способом.

Первый способ широко распространен в промышленности и характеризуется тем, что компоненты резиновой смеси перемешиваются при многократном проходе через смеситель до тех пор, пока не будет достигнута определенная степень однородности смеси. При непрерывном смешении требуемая степень однородности смеси должна быть достигнута за время одного прохода смешиваемых компонентов через смеситель. В большинстве технологических схем процессы смешения проводят в резиносмесителях с закрытой смесительной камерой, а в некоторых случаях — на вальцах.

Периодические процессы смешения в резиносмесителях в основном осуществляются в одну или две стадии. При одностадийном смешении каждая закладка смеси обрабатывается за один прием. При этом вулканизующие вещества и ускорители вводят в смесь в конце процесса смешения для предотвращения преждевременной подвулканизации смеси. При двухстадийном смешении вначале готовят так называемую маточную смесь, т. е. резиновую смесь без вулканизующих веществ и ускорителей, которая затем гранулируется или превращается в листы, опудривается и охлаждается. Во втором цикле смешения получают готовую смесь путем введения вулканизующих веществ и ускорителей в маточную смесь. По сравнению с одностадийным смешением здесь технологический процесс усложняется, так как включаются дополнительные операции: гранулирование, опудривание, охлаждение, транспортирование и хранение маточных смесей. Производительность при одностадийном смешении при использовании одного и того же типа резиносмесителя выше, чем при двухстадийном, поскольку исключаются загрузка и разогрев маточной смеси. Однако повышение прочности и других показателей резин благодаря лучшему перемешиванию и предупреждению преждевременной вулканизации смеси при двухстадийном смешении делают этот способ перемешивания наиболее подходящим для приготовления резиновых смесей, особенно на основе жестких каучуков с активными наполнителями в виде технического углерода.

Непрерывные процессы смешения могут производиться в резиносмесителе непрерывного действия в одну стадию или могут комбинироваться с периодическими по многостадийной системе.

10.1.1. Классификация и общее устройство

Резиносмесители периодического действия по виду выполняемых технологических операций классифицируются на *скоростные* (высокого давления) для изготов-

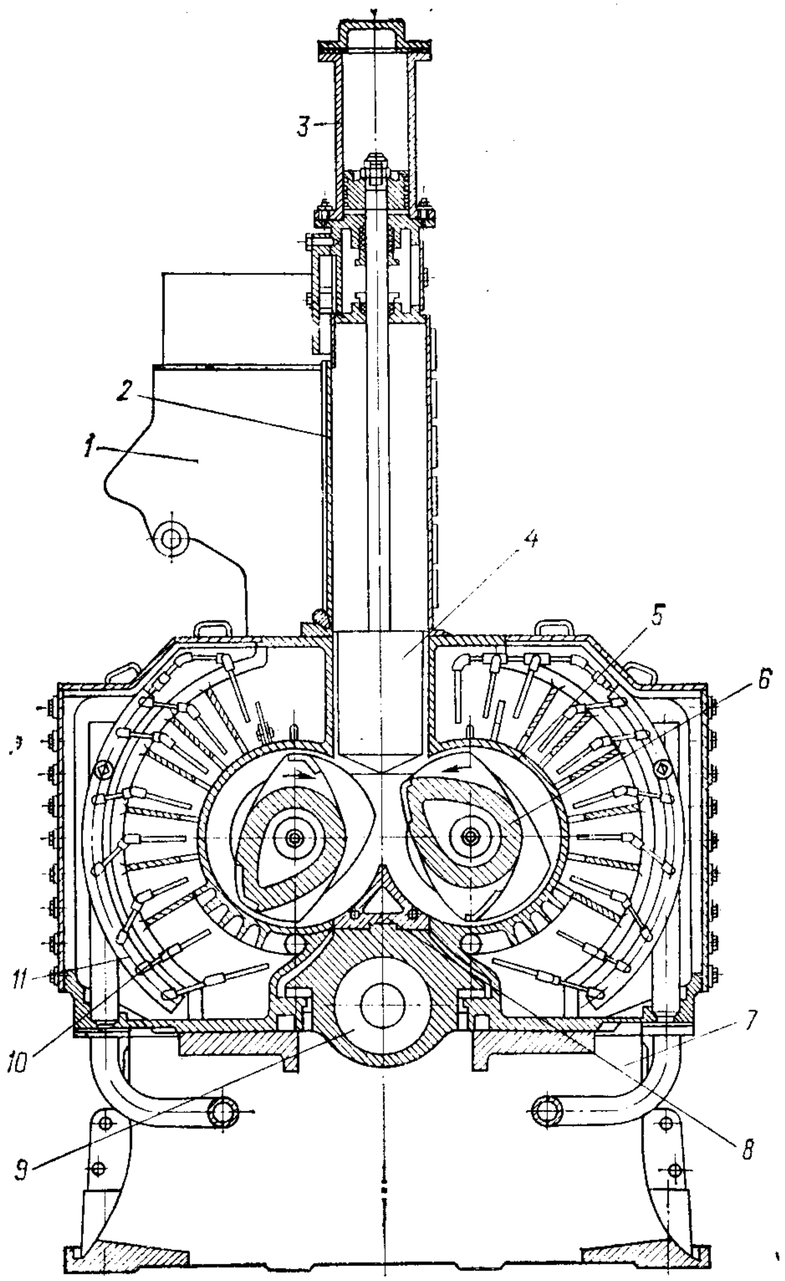


Рис. 10.1. Общий вид роторного смесителя Бенбери:

1 — загрузочная воронка; *2* — откидная дверца; *3, 9* — пневмоцилиндры; *4* — верхний затвор; *5* — корпус смесительной камеры; *6* — ротор; *7* — фундаментная плита; *8* — дверца; *10* — патрубки системы охлаждения; *11* — коллектор системы охлаждения.

ления маточных смесей с частотой вращения роторов 40—80 об/мин и *тихоходные* резиносмесители для второй стадии смешения с частотой вращения роторов 20—30 об/мин. По конструктивным признакам резиносмесители можно разделить на следующие группы: а) по конструкции привода (с индивидуальным и групповым); б) по форме роторов (с трехгранными, овальными цилиндрическими, четырехгранными и шевронными); в) по способу выгрузки готовой смеси (через боковую стенку смесительной камеры; с помощью нижнего затвора с

пневматическим или гидравлическим приводом; с помощью нижней откидной дверки); г) по давлению, оказываемому на смесь при смешении (до 0,3 и свыше 0,3 МПа). На практике применяются также системы классификации по конструкции подшипников, по системам смазки подшипников, по типу устройств уплотнений роторов.

Наиболее распространенной конструкцией резиносмесителя является смеситель с *овальными роторами,* называемый смесителем *типа Бенбери* (рис. 10.1). На фундаментной плите *7* установлен корпус смесительной камеры *5,* состоящий из двух полуцилиндров, двух боковин — торцевых стоек. В камере помещены два стальных фигурных ротора *6*, которые вращаются навстречу друг другу с различными скоростями. Загрузка компонентов резиновой смеси производится через загрузочную воронку *1*, снабженную откидной дверцей *2.* Верхний затвор *4* поднимается и опускается поршнем пневмоцилиндра *3.* Скользящая дверца *8* разгрузочного устройства перемещается горизонтальным пневмоцилиндром *9.* Роторы устанавливаются на подшипниках качения или скольжения и приводятся во вращение от электродвигателя через типовой или специальный блок-редуктор.

Процесс приготовления резиновой смеси начинается с подачи ингредиентов в определенной последовательности в рабочую камеру *5* через загрузочную воронку *1.* Далее загрузочное окно в камере *5* закрывается верхним затвором *4* для предотвращения выброса компонентов наружу при работе машины.

Пластикация и диспергирование компонентов сопровождаются интенсивным тепловыделением, поэтому для отвода излишнего тепла резиносмеситель имеет систему охлаждения. Наружные стенки смесительной камеры орошаются водой через многочисленные патрубки *10*, соединенные с коллектором *11.* Внутрь роторов также подается охлаждающая вода.

По окончании перемешивания вращение роторов приостанавливается и открывается скользящая дверца *8* разгрузочного устройства. При дальнейшем вращении роторов смесь выдавливается из смесительной камеры.

Для отсасывания газов и пыли, проникающих через уплотнительные устройства и откидную дверцу загрузочного бункера, над последним устанавливается вытяжной колпак, соединенный с системой вентиляции цеха.

Резиносмесители периодического действия роторного типа оснащаются системами тепловой и электрической автоматики, обеспечивающей полную автоматизацию технологического процесса смешения, загрузки и выгрузки смеси.

Основными *конструктивными параметрами* резиносмесителей являются свободный объем смесительной камеры (т. е. ее внутренний объем без объема, занимаемого роторами), частота вращения роторов, длина и диаметр ротора, расположение привода.

Таблица 10.1. Основные параметры и размеры резиносмесителей по ГОСТ 11996—79

Обозначение резиносмесителя	Свободный объем смесительной камеры, дм³	Коэффициент загрузки смесительной камеры**	Частота вращения роторов, об/мин		Давление на смесь, МПа	Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм (не более)	Мощность электродвигателя привода, кВт	Масса, т (не более)
			тихоходного	быстроходного				
4,5/20—140	4,5	0,47—0,85	17,4—122	20—140	0,6	3200×1200×2100	37	3
18/20; 30; 40; 60*	18	0,47—0,85	20; 30; 40; 60	20; 30; 40; 60	0,15	4500×1500×2500	100	8
71/11,5; 17,5; 23,5; 35	71	0,5—0,85	10,2; 15,5; 20,7; 31	11,5; 17,5; 23,5; 35	0,615	8300×4500×4500	60, 90, 120, 200	30
250/20	250	0,5—0,85	17	20	0,615	10 000×5000×6000	315	65
250/30	250	0,5—0,85	25	30	0,615	10 000×5000×6000	630	7
250/40	250	0,5—0,85	33,5	40	0,615	10 000×5000×6000	800	7
250/15—60*	250	0,5—0,85	15—60	15—60	0,615	10 000×5000×6000	1250	75
250/20—40*	250	0,5—0,85	16,5—33,5	20—40	0,615	10 000×5000×6000	1250	75
250/40—80*	250	0,5—0,85	33,5—67	40—80	0,615	10 000×5000×6000	1250	75
370/15—60*	370	0,5—0,85	12,5—50,5	15—60	0,615	10 000×5000×6000	200	120
620/50*; 630/50	620; 630	0,5—0,85	42,5	50	0,615	1400×8000×9000	4000	190
620/15—50*	620	0,5—0,85	12,5—42,5	15—50	0,615	1400×8000×9000	4000	190
630/15—50*	630	0,5—0,85	12,5—42,5	15—50	0,615	1400×8000×9000	4000	190

* Резиносмесители находятся в стадии разработки; значения параметров (кроме свободного объема) будут уточнены после испытания опытных образцов.

** Отношение заполненного объема смесительной камеры к общему ее объему.

ГОСТ 11996—79 регламентирует основные параметры и размеры резиносмесителей периодического действия со свободным объемом камеры от 4,5 до 630 дм³, предназначенных для приготовления резиновых смесей и пластикации натурального каучука. Эти параметры и размеры должны соответствовать указанным в табл. 10.1.

Резиносмесители должны изготавливаться в двух исполнениях — с левым или правым расположением привода (если смотреть на откидную дверцу загрузочной воронки).

Условное обозначение резиносмесителя должно содержать следующие сведения: свободный объем смесительной камеры; номинальную частоту вращения быстроходного ротора; расположение привода (П — правое, Л — левое); обозначение настоящего стандарта. Например, условное обозначение резиносмесителя со свободным объемом смесительной камеры 250 дм³, частотой вращения быстроходного ротора 20 об/мин, с правым расположением привода записывается следующим образом: Резиносмеситель 250/20—П ГОСТ 11996—79.

10.1.2. Деформационные процессы в рабочей камере

Приготовление резиновой смеси — это сложный механохимический процесс, в котором наряду с механическими процессами смешения и диспергирования происходят различные тепловые и химические процессы.

Различают простое и диспергирующее смешение. При *простом смешении* введение ингредиентов в полимер имеет целью достижение такого конечного их распределения, при котором в каждом микроэлементе объема композиции соотношение компонентов было бы равно исходному. Простое смешение не сопровождается уменьшением размеров частиц компонентов.

При *диспергирующем смешении* (диспергировании) процесс смешения сопровождается разрушением компонентов, т. е. уменьшением размеров частиц. Так, в процессе смешения каучука с техническим углеродом происходит измельчение агломератов технического углерода на отдельные коллоидные частицы. В процессе диспергирующего смешения механическая энергия затрачивается не только на пространственное перераспределение частиц, но и на их измельчение.

Смешение каучуковых многокомпонентных композиций, как правило, рассматривается как механический процесс, в котором за счет сдвиговых деформаций происходит диспергирование и распределение ингредиентов в каучуке. Этот процесс сопровождается физико-химическим взаимодействием молекул каучука с частицами наполнителей и других ингредиентов, а также механо-химическими процессами разрыва молекулярных цепей каучука с образованием химически активных радикалов.

Качественные показатели готовой смеси зависят от однородности распределения в основном компоненте (каучуке) других

ингредиентов. При этом многокомпонентную резиновую смесь можно рассматривать как двухкомпонентную, считая, что смешение каждого отдельного распределяемого компонента происходит во всей остальной системе, называемой основной. Очевидно, что только в идеальном случае может быть достигнута основная цель смешения — получение в каждом микроэлементе объема соотношения компонентов, равного исходному. В реальных процессах смешения этой цели полностью достичь не удается, а качество смешения оценивают методом статистического анализа проб, взятых из общей массы смеси. Смесь принято считать гомогенной, если распределение концентрации компонента в микрообъемах смеси подчиняется биномиальному закону.

Механическое смешение резиновых смесей ввиду большой вязкости основного компонента (каучука) осуществляется в ламинарном режиме при низких значениях числа Рейнольдса. Смешением компонентов за счет молекулярной диффузии обычно пренебрегают из-за малой скорости этого процесса. Физическую модель процесса смешения полимерного материала можно составить на основе рассмотрения деформационных процессов, сопровождающих процесс распределения ингредиента в основном компоненте под действием внешних сил. Рабочее пространство резиносмесителя условно представим ограниченным поверхностями двух коаксиальных цилиндров, из которых

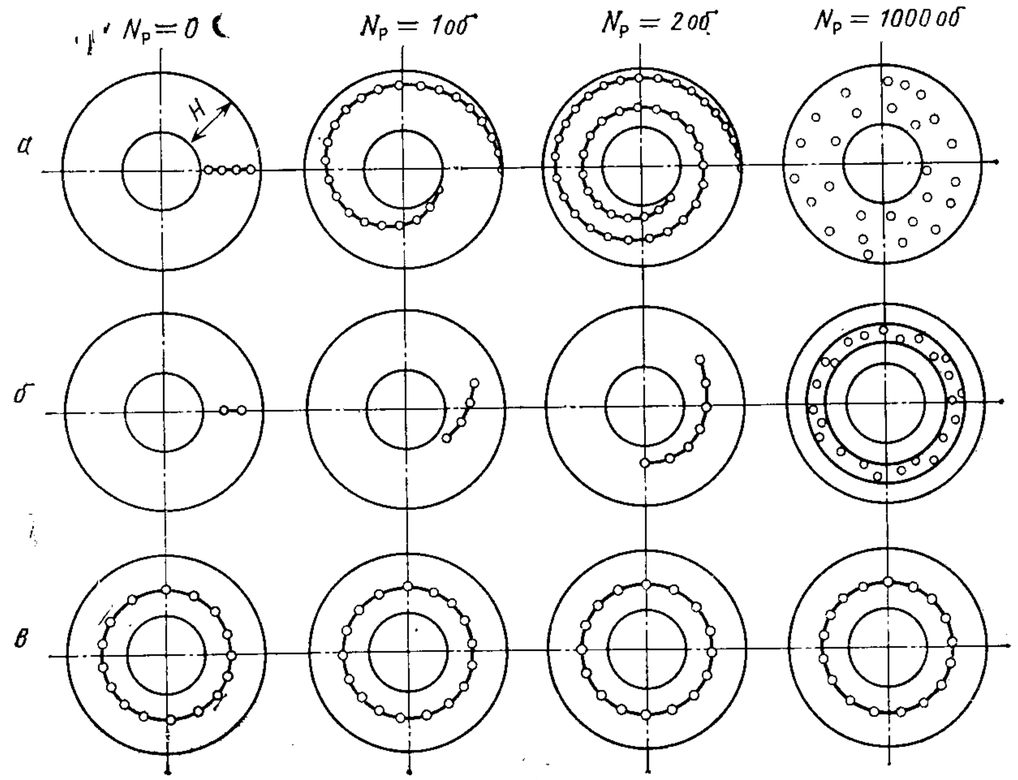
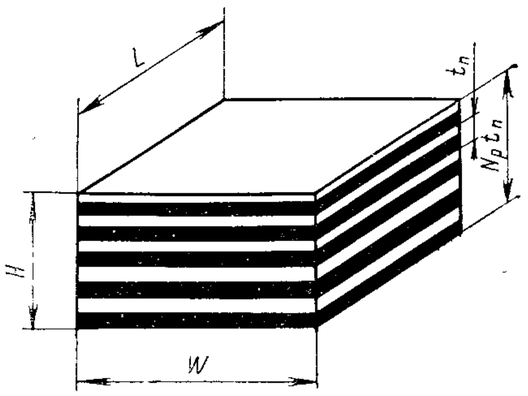


Рис. 10.2. Схема процесса смешения двухкомпонентной системы в ламинарном режиме. Пояснения в тексте.

Рис. 10.3. Элемент системы в ходе смешения вязких компонентов.



внутренний вращается, а внешний остается неподвижным (рис. 10.2). Рабочее пространство предполагается заполненным системой, обладающей свойствами сплошной среды, а расплавы основного и распределяемого компонентов считаются ньютоновскими жидкостями с одинаковой вязкостью. Скольжение между полимером и стенками коаксиальных цилиндров отсутствует, температура и объем системы в процессе смешения не изменяются.

В рабочем пространстве смесителя, изображенного на рис. 10.2, помещаются расплавы основного компонента (белого цвета) и распределяемого (шарики черного цвета). Распределяемый компонент располагается локализованно в радиальном направлении, занимая полностью рабочий зазор H (случай «*а*»). В случае «*б*» распределяемый компонент занимает $^1/_3$ зазора, в случае «*в*» компонент располагается вдоль линий тока.

После первого оборота внутреннего цилиндра ($N_р=1$) в случае «*а*» распределяемый компонент подвергается растяжению, поскольку при отсутствии скольжения его скорость движения у стенки внутреннего цилиндра будет равна линейной скорости движения внутреннего цилиндра. В результате дальнейшей деформации при $N_р=2$, 3 и т. д. полоса распределяемого (черного) компонента удлиняется все больше при одновременном уменьшении ее толщины. Если расстояние между двумя полосами (ближайшими витками спирали) обозначить $t_п$, то после $N_р$ оборотов $t_п=H/(N_р+1)\approx H/N_р$. Величину $t_п$ принято называть толщиной полосы. Эта величина может характеризовать качество смешения, т. е. однородность распределение одного компонента (в данном случае черного) в другом. Действительно, при $N_р=1000$ первоначальная толщина полосы распределяемого компонента уменьшится в 1000 раз, а распределение компонента в смеси можно при визуальной оценке определить как практически однородное.

В случае «*б*» частицы распределяемого компонента при достижении $N_р=1000$ равномерно распределяются внутри кольца, расположенного между стенками наружного и внутреннего цилиндров и имеющего ширину $^1/_3H$. Случай «*в*» иллюстрирует отсутствие перемешивания двух компонентов, поскольку все частицы распределяемого компонента движутся с постоянной скоростью вдоль линии тока.

Рассмотрим далее (рис. 10.3) элемент объема системы для случая «*а*» (см. рис. 10.2) с размерами: длина L, ширина W и

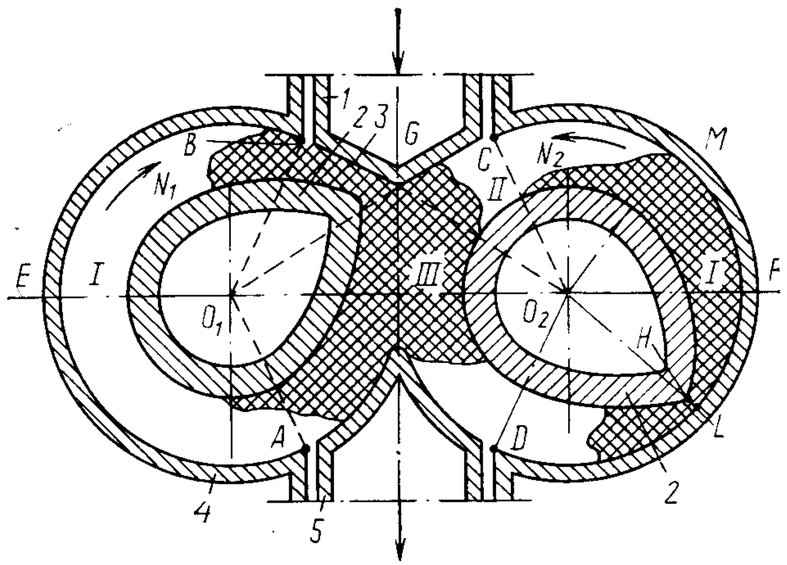


Рис. 10.4. Деформирование резиновой смеси в рабочей камере резиносмесителя. Пояснения в тексте.

высота H. Площадь раздела каждой из полос, образовавшихся после $N_р$ оборотов внутреннего цилиндра, будет равна $S_р = 2LW$; объем полосы $v_п = LWt_п$. Тогда общая площадь раздела полос $S_{р\,общ} = S_р N_р = 2LWN_р$ и объем всего элемента $v_{п\,общ} = v_п N_р = LWt_п N_р$. Следовательно, толщина полосы будет определяться следующим соотношением:

$$t_п = 2v_{п\,общ}/S_{р\,общ} \qquad (10.1)$$

Таким образом, с уменьшением толщины полос, т. е. с увеличением однородности смеси, увеличивается площадь контакта распределяемой (дисперсной) фазы и основной (дисперсионной) среды. Между толщиной полосы и площадью контакта наблюдается обратно пропорциональная зависимость. Образование дополнительной поверхности контакта обусловливается ростом деформации системы, от которой зависит однородность получаемой смеси (см. разд. 4.10).

Приведенный анализ физической картины смешения двух компонентов является в значительной степени упрощенным, не учитывающим, например, соотношение вязкостей компонентов реальных резиновых смесей, приводящее к доминирующей деформации основного компонента. Однако ценность представленной модели смешения заключается в том, что намеченный при ее анализе путь проведения оценки качества смешения позволяет сделать важный вывод: однородность полученной смеси зависит от первоначального расположения (ориентации) поверхности раздела двух компонентов и от развитой в системе деформации сдвига или (в ряде случаев) от общей деформации сдвига и растяжения.

Как уже было отмечено в разд. 4.10, количественная оценка степени смешения может быть проведена путем изучения сдви-

говой деформации γ в материале, которая в свою очередь определяется интенсивностью деформирования $\dot{\gamma}$ и временем смешения t. В различных частях рабочей камеры резиносмесителя интенсивность деформирования компонентов смеси различна. В реальных конструкциях рабочих камер создаются различные градиенты скорости $\dot{\gamma}$ и, следовательно, различная интенсивность смешения. При проведении перемешивания компонентов резиновой смеси стараются обеспечить наивыгоднейшую первоначальную ориентацию поверхностей раздела двух компонентов. Это достигается путем создания в рабочей камере такого характера движения смеси, при котором линии тока жидкости (каучука) непрерывно изменяют свое направление в цикле смешения.

Наиболее эффективным способом интенсификации процесса смешения является увеличение частоты вращения роторов. Экспериментальным путем было доказано, что средняя скорость сдвига $\dot{\gamma}$ в смесителе изменяется пропорционально частоте вращения $N_р$, причем увеличение $N_р$ в 2 раза сокращает цикл смешения на 30—50%.

Рассмотрим процесс деформирования резиновой смеси в рабочей камере резиносмесителя, изображенной схематически на рис. 10.4. Роторы *2*, вращаясь навстречу друг другу с разными частотами вращения N_1 и N_2 в пространстве, ограниченном стенками рабочей камеры *4*, верхним затвором *1* и нижним затвором *5*, подвергают диспергирующему смешению резиновую смесь *3*. Поле сдвиговых деформаций, развивающихся в материале в поперечном сечении рабочей камеры, можно разбить на три зоны (*I*, *II*, *III*) деформаций сдвига. Наибольшая интенсивность деформирования реализуется в пространствах, заключенных между поверхностями гребня ротора и стенки камеры или в областях $BEAO_1$ и $CMFDO_2$ — секторах, соответствующих серповидным зонам деформации *I*. Скорость сдвига в серповидном зазоре резиносмесителя периодического действия достигает 500 $с^{-1}$. Зона деформации *II*, заключенная в областях BO_1G и GO_2C, характеризуется несколько меньшими значениями интенсивности деформирования. В зоне *II* материал интенсивно сжимается и, оказы-

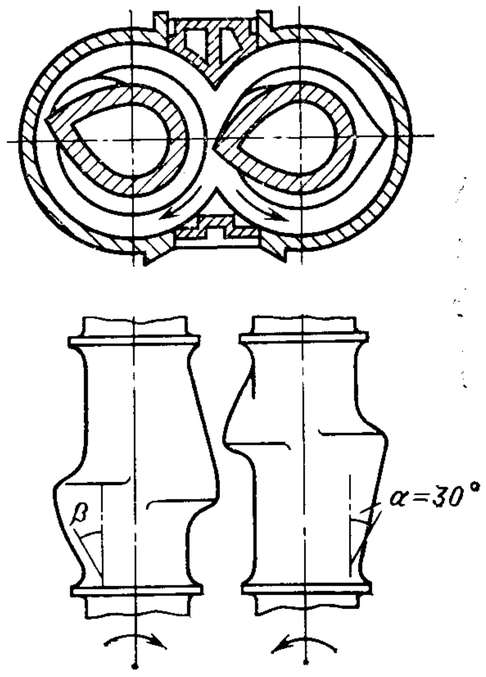


Рис. 10.5. Схема расположения гребней роторов в камере резиносмесителя.

вая давление на крышку верхнего затвора *1*, поднимает его толчками вверх. В зоне *III* (GO_1ADO_2G) происходит смешение двух потоков, сопровождающееся вминанием и вдавливанием ингредиентов резиновой смеси в каучук. Далее смесь разделяется на два потока и снова поступает в зону деформации *I*.

Каждый из овальных роторов конструктивно выполнен в виде прерывистой спирали (рис. 10.5), а в любом поперечном сечении гребень ротора представляет собой сужающийся в одну сторону эллипс. Поверхность каждого из роторов образована двумя винтообразными лопастями, одна из которых, более длинная, имеет угол подъема винтовой линии $\alpha=30°$, а другая — угол подъема $\beta=45°$. Угол закручивания винтовой поверхности составляет 90°. Столь сложная конфигурация поверхности ротора необходима для увеличения смесительного эффекта благодаря созданию осевого перемещения резиновой смеси. Расположение роторов в рабочей камере таково, что против длинного гребня одного ротора находится короткий гребень другого. Вследствие этого резиновая смесь приобретает движение сложного характера с траекторией, имеющей вид пространственной «восьмерки», что создает предпосылки для интенсивного перемешивания компонентов резиновой смеси.

10.1.3. Поле давлений и скоростей в рабочей камере и мощность привода роторов

Давление в камере смесителя является одним из наиболее важных факторов при изготовлении резиновых смесей. Следует, однако, отметить, что верхний затвор не создает постоянного гидростатического давления во всем объеме камеры, поскольку она бывает заполнена смесью лишь на 60—70%. Верхний затвор создает давление лишь в локальной области деформирования смеси и препятствует ее выходу через горловину загрузочной воронки. При увеличении давления на смесь со стороны верхнего затвора увеличивается интенсивность перемешивания и растет производительность процесса смешения. Давление верхнего затвора в реальном процессе смешения составляет не более 0,5—0,7 МПа, однако экспериментальные исследования показали, что давление смеси на стенки камеры в серповидном зазоре при вращении роторов может достигать значений, в десятки раз больших. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в процессе деформирования резиновой смеси кроме сдвиговых развиваются и значительные нормальные напряжения, связанные с гидродинамическим увеличением давления в клинообразной области серповидного зазора.

Рассмотрим механику деформирования резиновой смеси в серповидном зазоре, образованном двумя рабочими поверхностями: цилиндрической поверхностью камеры с центром окружности сечения O_1 и поверхностью лопасти ротора, также имеющей в нормальном сечении форму окружности с центром в точ-

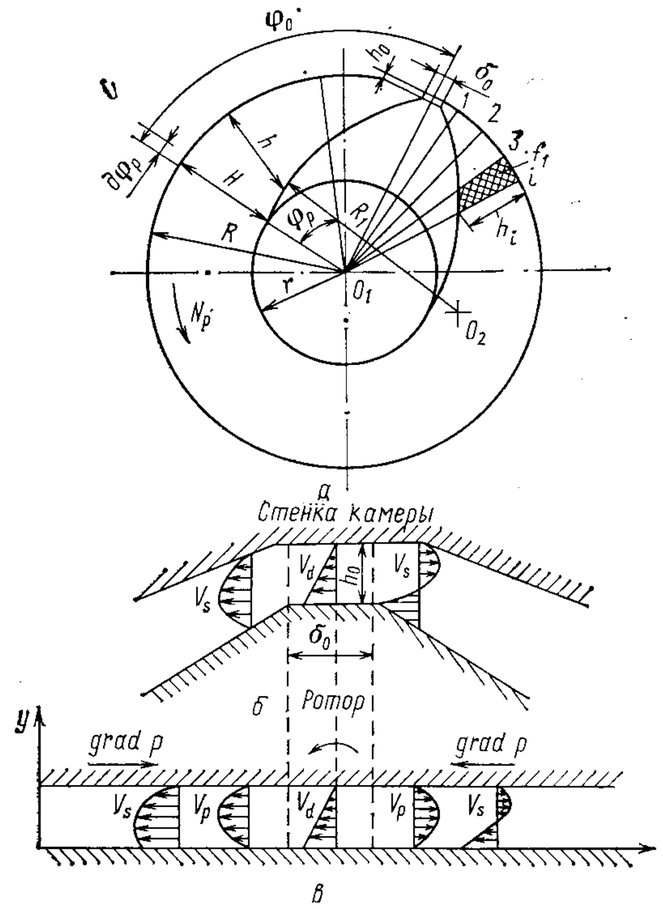


Рис. 10.6. Параметры смесительного механизма (*а*), профили скоростей вблизи зазора (*б*) и их развертка (*в*). Пояснения в тексте.

ке O_2 (рис. 10.6). Зона захвата смеси характеризуется максимальным зазором H, а минимальный зазор h_0 образован площадкой гребня и стенкой камеры. Ротор вращается с частотой $N_р$. Движение материала в данном зазоре может происходить в сходящемся потоке с геометрическими характеристиками H/h_0 или $H/(R\varphi_р)$. Для большинства современных конструкций резиносмесителей эти параметры равны 25—35 и 0,21—0,25 соответственно.

В плоскости сечения серповидного зазора, перпендикулярного оси вращения ротора, суммарное поле скоростей течения $\vec{V}_s$ будет складываться из векторов скоростей вынужденного потока $\vec{V}_d$, возникающего вследствие вращения ротора, и барического потока $\vec{V}_p$, обусловленного градиентом давления $\partial p/\partial x$ (рис. 10.6, *б*, *в*). В зоне минимального зазора h_0 давление p имеет максимальное значение, а величина $\vec{V}_p$ меняет знак. Градиент давления ($\operatorname{grad} p$) противоположен по направлению вектору скорости потока $\vec{V}_p$.

При условии одномерного течения жидкости с постоянной вязкостью η в изотермических стационарных условиях без учета скольжения и упругих свойств резиновой смеси можно записать уравнение Навье — Стокса для простого сдвига:

$$\frac{\partial p}{\partial (R\varphi_р)} = \eta \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \qquad (10.2)$$

где $R\varphi_р = x$ — координата длины окружности сечения камеры в серповидном зазоре.

Проинтегрировав (10.2) как уравнение с разделяющимися переменными, с учетом граничных условий получаем

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{2\pi R N_p}{h} + \frac{y}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{h}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x} \qquad (10.3)$$

Первое слагаемое в формуле (10.3) характеризует распределение скоростей вынужденного потока, а второе и третье — распределение скоростей барического потока.

Для пристенного слоя $y=h$ получаем

$$\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)_w = \frac{2\pi R N_p}{h} + \frac{h}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x} \qquad (10.4)$$

Умножив обе части уравнения на η, находим:

$$\tau_w = \frac{2\pi R N_p}{h}\eta + \frac{h}{2}\frac{\partial p}{\partial x}, \quad \text{или} \quad \tau_w = \tau_d + \tau_p \qquad (10.5)$$

где τ_w, τ_d и τ_p — напряжение сдвига у стенки суммарное, от вынужденного потока и от барического потока соответственно.

С уменьшением $h(\varphi_p)$ значение τ_d возрастает, а значение τ_p при постоянном $\partial p/\partial x$ снижается. Поэтому величина τ_w оказывается практически не зависимой от угла поворота ротора.

Экспериментальное изучение распределения давления p в серповидном зазоре показало, что p увеличивается от нуля на входе в зазор до $p_{макс}$ на участке с высотой зазора h_0. Давление p практически пропорционально углу поворота φ_p:

$$p = kR\varphi_p$$

Если принять, что $k=\partial p/\partial(R\varphi_p)$ — прирост давления по углу φ_p, то при $\varphi_p=\varphi_0$ предыдущее выражение упрощается и приобретает вид

$$p_{макс} = R\varphi_0\frac{1}{R}\frac{\partial p}{\partial \varphi_p} = \varphi_0\frac{\partial p}{\partial \varphi_p} \qquad (10.6)$$

Таким образом, значение $p_{макс}$ не зависит от размера смесительной камеры R, а определяется лишь значениями φ_0 и $\partial p/\partial\varphi_p$. Величина приращения давления по углу поворота (величина $\partial p/\partial\varphi_p$) зависит от геометрии серповидного зазора и от расстояния между точками O_1 и O_2. На практике можно принять $\partial p/\partial\varphi_p \approx 2$ МПа/рад. При изучении реологического поведения резиновых смесей была экспериментально установлена взаимосвязь между давлением p и напряжением сдвига τ в любой точке объема:

$$p = 3\tau$$

Используя зависимость (1.11), получаем: $p=3m\dot{\gamma}^n$.

Определив скорость сдвига в зазоре h_0 как

$$\dot{\gamma} = \pi R N_p/(30h_0)$$

получим выражение для расчета $p_{макс}$ с учетом реологических свойств резиновой смеси:

$$p_{макс} = 3m\pi^n R^n N_p{}^n/(30^n h_0{}^n) \qquad (10.7)$$

Усилие сдвига на стенке камеры определяется по формуле

$$T = \tau_w S_к \qquad (10.8)$$

где $S_к$ — поверхность камеры в серповидном зазоре, равная $S_к=\varphi_p R(L_1+L_2)Z\xi_к$ (здесь L_1, L_2 — длины проекций короткой и длинной лопастей ротора на его ось; Z — число пар лопастей ротора; $\xi_к=0{,}75$ — коэффициент использования рабочей поверхности).

Для определения крутящего момента на валу ротора может быть использовано выражение

$$M_к = \tau_w S_к R \qquad (10.9)$$

а мощность на валу находят из соотношения

$$W_p = 2\pi M_к N_p = 2\pi\tau_w S_к R N_p \qquad (10.10)$$

По выражению (10.10) можно проводить приближенную оценку потребляемой при смешении мощности. Значение τ_w, входящее в (10.10), вычисляют по формуле (10.5) при $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial(\varphi_p)}\frac{1}{R} \approx 2\frac{1}{R}$ (МПа/м) и $h=(H+h_0)/2$.

Для более точных параметрических расчетов по определению затрат мощности (кВт) в закрытом двухроторном резиносмесителе следует воспользоваться уравнением

$$W_p = 2\left(\frac{\pi\omega_{ср}}{60}\right)^{n+1}\left\{[l_1(0{,}5^{n+1}+0{,}865^{n+1})+2l_2\,0{,}705^{n+1}]F + \left(\frac{D_{кр}}{h_0}\right)^{n+1}h_0\delta_0(l_1+l_2)\right\} \qquad (10.11)$$

где $\omega_{ср}=(\omega_1+\omega_2)/2$ (здесь ω_1 и ω_2 — угловые скорости переднего и заднего валков, $с^{-1}$); n — реологическая константа; l_1 и l_2 — длины длинного и короткого гребней ротора соответственно, м; $D_{кр}$ — диаметр гребня ротора по кромке, м; δ_0 — ширина кромки, м.

При получении выражения (10.11) сечение материала, находящегося в серповидном зазоре, разбивалось на ряд элементов. Затем определялась мощность, затрачиваемая в каждом из элементов, и полученные значения мощностей суммировались.

Величина F ($м^2$) определяется по формуле

$$F = \sum_{i=1}^{n_э}\left(\frac{D_к}{h_i}-2\right)^{n+1} f_i \qquad (10.12)$$

где $n_э$ — число элементов, на которое разбивается деформируемый объем в зазоре между ротором и стенкой камеры ($n_э \approx 14\div 28$); $D_к$ — внутренний диаметр камеры, м; h_i — зазор между гребнем ротора и камерой для одного элемента, м (см. рис. 10.6, *а*); f_i — площадь сечения i-го элемента, $м^2$.

Рассчитанное подобным образом значение $W_р$ относится к установившемуся режиму работы в конце процесса смешения. С учетом перегрузок во время введения ингредиентов в резиносмеситель мощность двигателя привода определяется как

$$W_{дв} = K_п W_р / \eta_{рд} \qquad (10.13)$$

где $K_п$ — коэффициент перегрузки ($K_п = 1{,}5$); $\eta_{рд}$ — к. п. д. редуктора ($\eta_{рд} \approx \approx 0{,}8$).

Производительность резиносмесителя периодического действия с закрытой камерой смешения может быть определена как

$$G = 60 v_1 \rho \alpha_м / t_ц \qquad (10.14)$$

где v_1 — объем загрузки материала в камеру; $v_1 = (0{,}5 \div 0{,}6) v_к$ (здесь $v_к$ — объем камеры); ρ — плотность резиновой смеси; $\alpha_м$ — коэффициент использования машинного времени ($\alpha_м = 0{,}8 \div 0{,}9$); $t_ц$ — продолжительность цикла смешения.

Время $t_ц$ может быть определено по следующему соотношению:

$$t_ц = t_{см} + t_в \qquad (10.15)$$

где $t_{см}$ — время смешения, определяемое обычно опытным путем в зависимости от свойств композиции, конструкции резиносмесителя и технологических параметров процесса смешения ($t_{см} = 2 \div 10$ мин); $t_в$ — время вспомогательных операций, обычно составляет $(0{,}1 \div 0{,}15) t_{см}$.

10.1.4. Конструкция и расчет смесительных камер и роторов

Смесительная камера (рис. 10.7) состоит из двух полуцилиндров — обечаек *1*, вставленных в корпус *2*, имеющий ребра жесткости *3*. Материалом для изготовления камеры и корпуса служит стальное литье марки 45Л. В ряде конструкций при изготовлении смесительной камеры проводится упрочнение ее по-

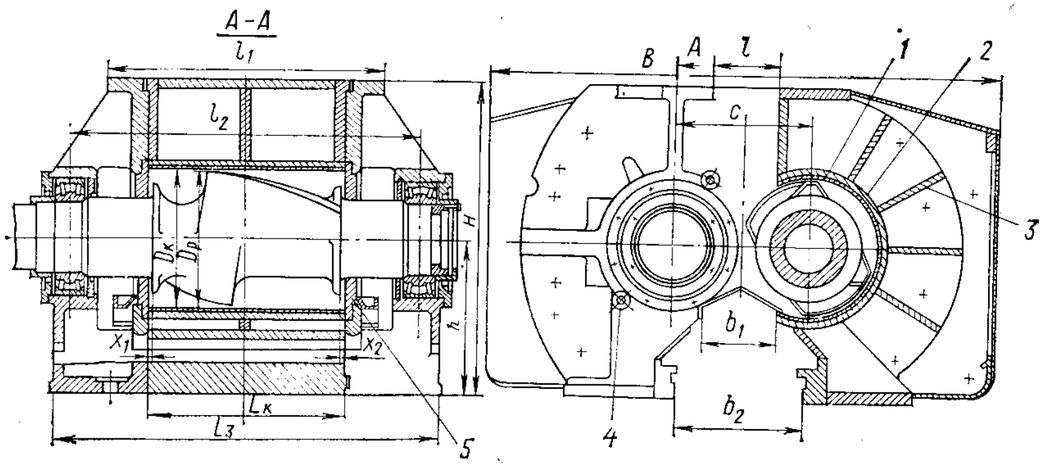


Рис. 10.7. Конструкция рабочей смесительной камеры резиносмесителя: *1* — обечайка; *2* — корпус; *3* — ребро жесткости; *4* — болт; *5* — боковина.

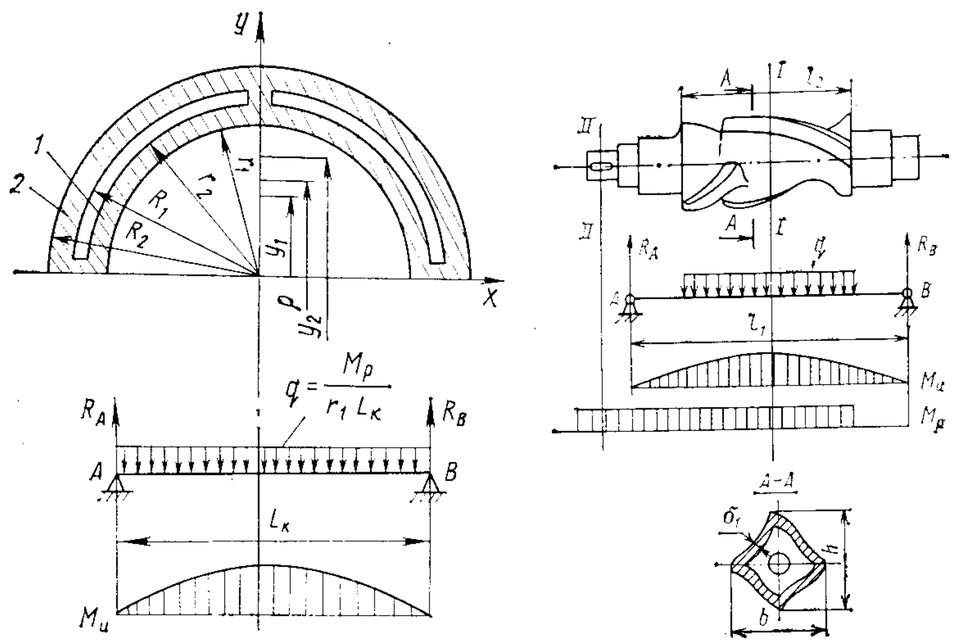


Рис. 10.8. Расчетная схема рабочей смесительной камеры. Пояснения в тексте.

Рис. 10.9. Расчетная схема ротора. Пояснения в тексте.

верхности путем наплавки твердого сплава. Болты *4* скрепляют оба полуцилиндра посредством чугунных боковин *5*.

Смесительные камеры оборудования, выпускаемого отечественной промышленностью, нормализованы в зависимости от свободного объема смесителя (см. табл. 10.2 и обозначения на рис. 10.7).

Прочностной расчет смесительной камеры сводится к определению напряжений в стенках полуцилиндров обечаек, толщина которых принимается равной 0,10—0,12 радиуса кривизны цилиндрической поверхности. Полукамеру, закрепленную в боковинах, рассматривают как балку, нагруженную равномерной нагрузкой и покоящуюся на двух опорах (рис. 10.8). Сечение балки представляет собой фигуру, составленную из двух жестко связанных полуколец: полукольцо *1* (обечайка) и полукольцо *2* (корпус), между которыми расположена полость для ввода охлаждающей жидкости.

Напряжение изгиба $\sigma_и$ определяется по формуле

$$\sigma_и = (M_и / I_x)\, y_{макс} \qquad (10.16)$$

Изгибающий момент $M_и$ вычисляем следующим образом:

$$M_и = T L_к / 8 \qquad (10.17)$$

где $T = M_р f / r_1$; здесь $M_р = M_к K_п$ — расчетный крутящий момент на валу ротора [см. формулу (10.9)]; $K_п = 1{,}7$ — коэффициент перегрузки в момент запуска резиносмесителя; $f = 0{,}04$ — коэффициент трения резины по стали; r_1 — радиус камеры; $L_к$ — длина камеры.

Таблица 10.2. Основные размеры смесительной камеры

Свободный объем камеры, дм³	B	H	h	$L_к$	l_1	l_2
71	1542	1010	490	610	800	1095
250	2064	1295	650	810	1120	1418

Геометрические характеристики сложного сечения, образованного двумя полукольцами, определяем по следующим формулам:

$$\rho = (F_1 y_1 + F_2 y_2)/(F_1 + F_2) \tag{10.18}$$

$$F_1 = \pi (R_2^2 - R_1^2)/4; \qquad F_2 = \pi (r_2^2 - r_1^2)/4 \tag{10.19}$$

$$y_1 = \frac{4}{3\pi} \frac{R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2}{R_1 + R_2}$$

$$y_2 = \frac{4}{3\pi} \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1 + r_2} \tag{10.20}$$

Осевой момент инерции I_x относительно оси x равен

$$I_x = I_1 + a_1^2 F_1 + I_2 + a_2^2 F_2 \tag{10.21}$$

Осевой момент инерции внутреннего полукольца равен

$$I_1 = \pi (r_2^4 - r_1^4)/8 \tag{10.22}$$

Осевой момент инерции внешнего полукольца составляет

$$I_2 = \pi (R_2^4 - R_1^4)/8 \tag{10.23}$$

Здесь a_1 и a_2 — геометрические характеристики, равные

$$a_1 = \rho - y_1; \qquad a_2 = y_2 - \rho \tag{10.24}$$

Напряжение изгиба определяем на внутренней ($y_{макс} = \rho$) и внешней ($y_{макс} = R_2 - \rho$) поверхностях составного полуцилиндра:

$$\sigma_{и1} = (M_и / I_x)\, \rho < [\sigma]$$

$$\sigma_{и2} = (M_и / I_x)\, (R_2 - \rho) < [\sigma] \tag{10.25}$$

где $[\sigma] = \sigma_в / n_в$ ($\sigma_в \approx 500$ МПа, $n_в = 3$ для стали 45 Л).

Роторы резиносмесителя являются главными рабочими органами машины и их внешняя конфигурация предопределяет перемешивающую способность оборудования в целом. В отечественной промышленности нашли применение роторы овального поперечного сечения (см. рис. 10.5), а также S-образной формы (рис. 10.9). Геометрическое построение лопастей роторов-смесителей описано в специальной литературе*.

* *Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е.* Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1972, с. 86—90.

резиносмесителя (в мм)

l_3	$D_к$	$D_р$	l	c	b_1	b_2	x_1	x_2
1390	360	357	270	370	255	390	1	2
1550	560	554	293	560	305	530	1	3

Роторы изготавливаются цельными (лопастная часть отливается заодно с цапфами). Их отливают из стали марок 35ЛП и 45ЛП. С целью упрочнения поверхности на лопасти наваривают твердый сплав. Технические характеристики роторов двухроторных смесителей периодического действия представлены в табл. 10.3.

Расчет на прочность ротора проводится с учетом значения мощности $W_р$, потребляемой на перемешивание и рассчитываемой по формуле (10.11). Распределение мощности между тихоходным $W_т$ и быстроходным $W_б$ роторами производится пропорционально частотам их вращения $N_т$ и $N_б$:

$$W_б = W_р \frac{N_б}{N_б + N_т}; \qquad W_т = W_р \frac{N_т}{N_б + N_т} \tag{10.26}$$

Так как размеры и конфигурация гребней роторов одинаковы, то могут быть приравнены и крутящие моменты, передаваемые роторами:

$$M_р = 97{,}4 \frac{W_б}{N_б} = 97{,}4 \frac{W_т}{N_т} \tag{10.27}$$

На фигурную часть ротора воздействуют следующие силовые факторы: равномерно распределенная нагрузка $q = q_м + q_т$ (см. рис. 10.9) и крутящий момент $M_р$, действующий по всей длине ротора.

Таблица 10.3. Технические характеристики роторов двухроторных смесителей

Свободный объем камеры, дм³	Наружный диаметр ротора, мм	Рабочая длина ротора, мм	Зазор между торцами ротора и торцевыми стенками корпуса, мм	Частота вращения заднего ротора, об/мин	Фрикция Ф
71	357	607	1,5	29,5	1,15
250	554	806	2	25	1,2

Свободный объем камеры, дм³	Расстояние между центрами роторов, мм	Частота вращения переднего ротора, об/мин	Внутренний диаметр камеры, мм	Диаметр опорных шеек, мм	Расстояние между подшипниками, мм
71	370	33,7	360	200	1095
250	560	30	560	300	1420

Равномерно распределенная нагрузка от сопротивления перемешиваемой среды $q_м$ составляет

$$q_м = M_р/(R_{макс} l_2) \qquad (10.28)$$

где $R_{макс}$ — максимальный радиус ротора; l_2 — длина фигурной части ротора.

Равномерно распределенная нагрузка от действия верхнего затвора $q_г$ равна

$$q_г = Q_в/(2l_2) \qquad (10.29)$$

где $Q_в$ — усилие, создаваемое пневмоприводом верхнего затвора.

Помимо поперечных нагрузок и крутящего момента на каждый из роторов воздействуют и осевые нагрузки, приложенные к винтовой поверхности короткой и длинной лопастей. Эти нагрузки при правильно выбранной геометрии лопастей должны уравновешивать друг друга. Прочностной расчет проводим в сечениях *I—I* и *II—II* тела ротора (см. рис. 11.9).

Для сечения *I—I* напряжения σ_1 от изгибающего момента с учетом пусковой перегрузки определяются по формуле

$$\sigma_1 = (K_п M_и/I)\, y_{макс} \qquad (10.30)$$

где $K_п$ — коэффициент перегрузки.

Осевой момент инерции поперечного сечения фигурной части можно приближенно вычислить следующим образом:

$$I = [Fh/(6b)]\,[S + F\,(b - h)/(bh)]\,\delta_1 \qquad (10.31)$$

где F — площадь внутри наружного контура; h и b — высота и ширина сечения; S — длина периметра стенки ротора; δ_1 — толщина стенки.

Далее, считая, что $y_{макс} = h/2$, определяем σ_1.

Напряжение сдвига от крутящего момента $M_р$ в сечении *I—I* определяется так:

$$\tau_к = M_р/(2\delta_1 F) \qquad (10.32)$$

Приведенное напряжение от совместного воздействия изгиба и кручения $\sigma_{пр}$ равно

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau_к^2} < [\sigma] = \sigma_т/n_S \qquad (10.33)$$

Запас прочности n_S по сопротивлению пластическим деформациям в сечении *I—I* для стали 45ЛП принимается равным 0,6.

В сечении ротора *II—II* действует только крутящий момент $M_р$, и напряжение $\tau_к$ вычисляется по формуле

$$\tau_к = M_р/W_р' < [\tau_к] = \tau_{-1}/n_т \qquad (10.34)$$

где $W'_р$ — полярный момент сопротивления; τ_{-1} — предел усталости при кручении; $n_т$ — коэффициент запаса усталостной прочности при кручении; для стали 45ЛП $\sigma_{-1} = 130$ МПа, $n_т \geqslant 2{,}2$.

Полярный момент сопротивления $W'_р$ равен

$$W_р' = \pi D_ш^3/16 - b_п h_п\,(2D_ш - h_п)/(8D_ш)$$

где $D_ш$ — диаметр шейки ротора под муфту; $b_п$ и $h_п$ — ширина шпоночного паза и высота шпонки соответственно.

В качестве опор роторов в современных конструкциях резиносмесителей используются подшипники качения. Наиболее рациональной с точки зрения условий нагрузки и деформации признана опора на радиальный сферический двухрядный роликоподшипник, использованный в конструкции, представленной на рис. 10.10. Со стороны ввода теплоносителя в ротор подшипник *2* закрепляется гайкой *6* и затягивается крышкой *4*. Крышки устанавливаются на прокладках *5* и зажимаются болтами *3*. Между шейками ротора и крышками для предотвращения потерь смазки предусмотрены севанитовые уплотнения *7*. Подшипники устанавливаются с зазором по отношению к выступам крышек с целью обеспечения осевого перемещения наружного кольца подшипника. Подшипник, устанавливаемый со стороны привода, поджимается распорными кольцами *1* с монтажным зазором 0,3 мм с каждой стороны наружного кольца подшипника.

С целью предотвращения выдавливания резиновой смеси из камеры в зазор между шейкой вала ротора и боковиной этот узел снабжается также уплотнительными устройствами контактного и бесконтактного типов.

Лабиринтное уплотнение бесконтактного типа (рис. 10.11) состоит из двух лабиринтных колец *3* и *4*, а также разъемного сальникового кольца *1*, закрепленного на полукамере. В кольце *3* выполнена винтовая нарезка, направление кото-

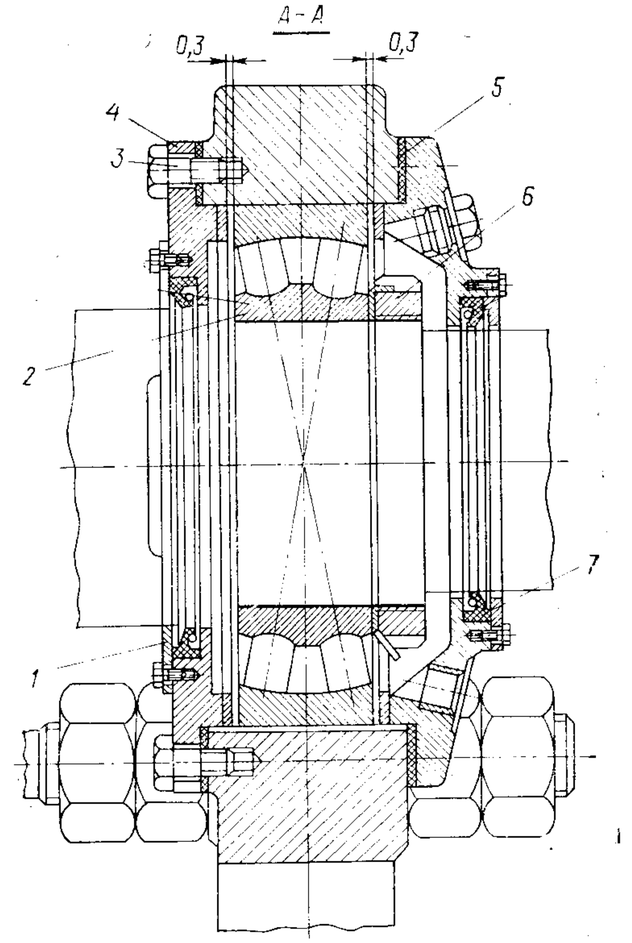


Рис. 10.10. Опоры качения ротора:

1 — распорное кольцо; *2* — подшипник; *3* — болт; *4* — крышка; *5* — прокладка; *6* — гайка; *7* — севанитовое уплотнение.

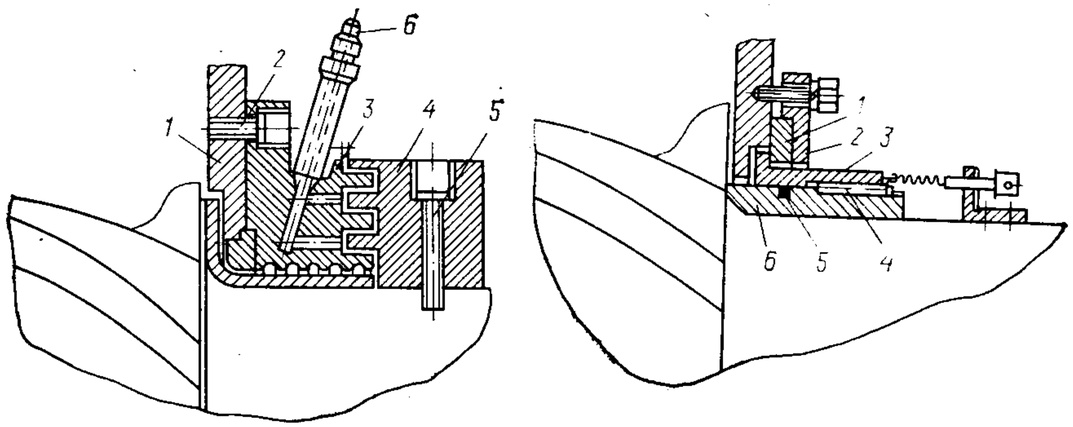


Рис. 10.11. Лабиринтное уплотнение бесконтактного типа:
1 — разъемное сальниковое кольцо; *2, 5* — винты; *3, 4* — лабиринтные кольца; *6* — масленка.

Рис. 10.12. Самоуплотняющееся уплотнение шеек ротора:
1 — фрикционные полукольца; *2* — нажимное кольцо; *3* — плавающая втулка; *4* — шпонка; *5* — резиновое кольцо; *6* — сменная втулка ротора.

рой противоположно направлению вращения ротора. Кольцо *3* закреплено винтом *2*, а лабиринтное кольцо *4* — на роторе винтом *5*. Через масленку *6* в зазор лабиринтного уплотнения принудительно от насоса подается масло, которое вместе с ингредиентами смеси образует защитную массу. Эта масса является смазкой поверхностей трения и выполняет роль пробки, герметизирующей камеру смешения. Однако полной герметизации в этом уплотнении достичь не удается, и за один час из камеры выпрессовывается до 400 г смеси.

На рис. 10.12 показано *самоуплотняющееся уплотнение.* К боковине с помощью нажимного кольца *2* прижаты фрикционные полукольца *1*. Плавающая втулка *3* посредством пружины контактирует с фрикционными полукольцами *1*. Шпонка *4* обеспечивает вращение втулки *3* вместе со сменной втулкой ротора *6*. Резиновое кольцо *5* предотвращает выход газообразных веществ и пыли из рабочей камеры смесителя. Фрикционные полукольца подлежат частой замене из-за износа; они изготавливаются из бронзы и специальных антифрикционных материалов.

10.1.5. Конструкция и расчет основных механизмов

Привод резиносмесителя современной конструкции состоит из электродвигателя большой мощности и системы передач. Соотношение частот вращения заднего (быстроходного) ротора $N_б$ и переднего (тихоходного) ротора $N_т$, называемое *фрикцией* $Ф = N_б/N_т$, для резиносмесителей составляет в среднем 1,11—1,18.

Три варианта наиболее распространенных кинематических схем приводов представлены на рис. 10.13. В схеме, показан-

ной на рис. 10.13, *а*, групповой привод роторов *1* и *2* двух резиносмесителей осуществляется от тихоходного ($N_т = 94 \div 150$ об/мин) электродвигателя *7* через трансмиссионный вал *5*, муфты *6*, приводные шестерни *4* и фрикционные шестерни *3*. Однако при большой потребляемой мощности тихоходные электродвигатели имеют большие габариты, сложны и дороги в исполнении и эксплуатации. Поэтому в настоящее время получил распространение индивидуальный привод, состоящий из малогабаритного быстроходного асинхронного двигателя, работающего с понижением частоты вращения через муфту *8* и ре-

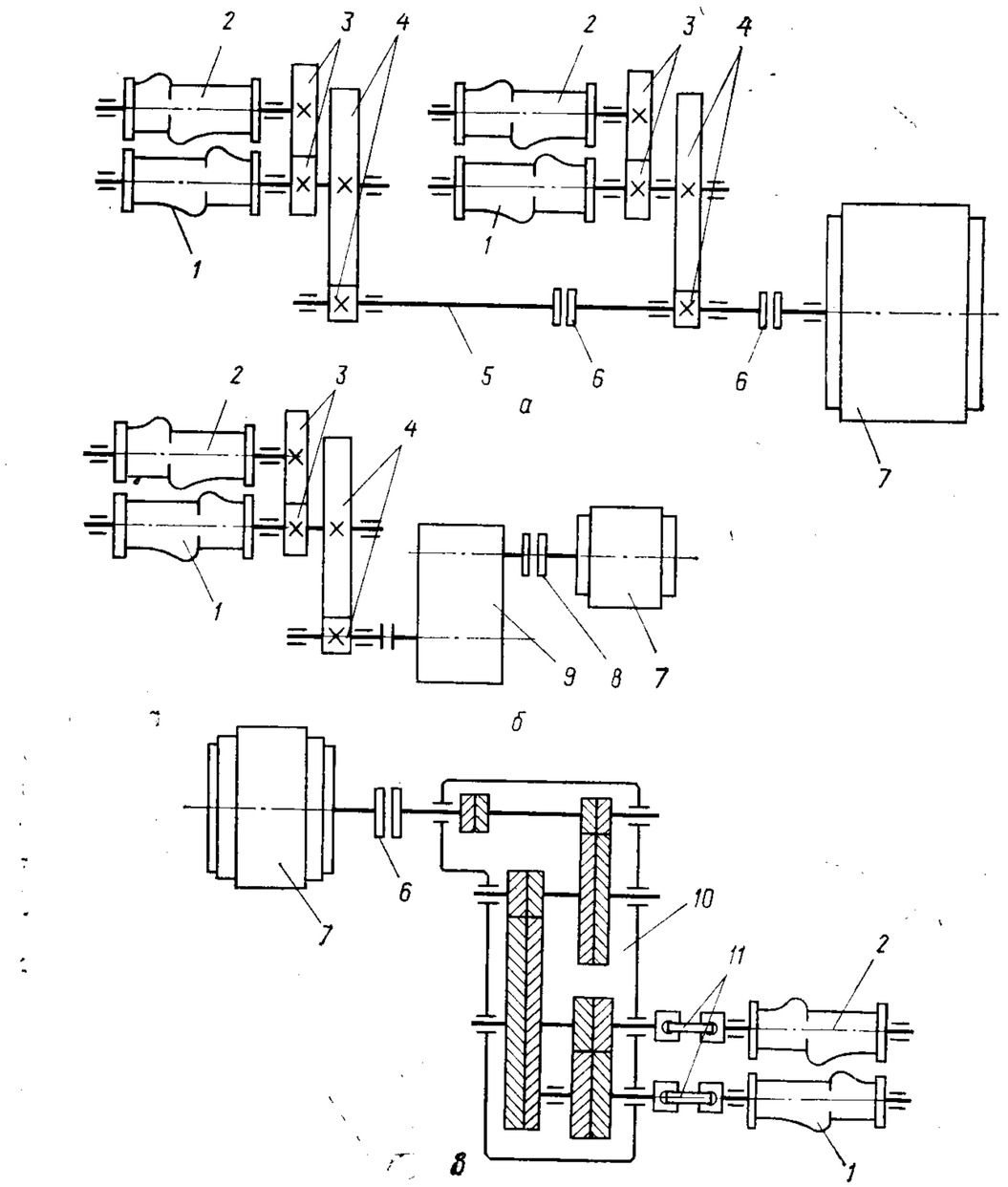


Рис. 10.13. Кинематические схемы приводов резиносмесителей — группового (*а*) и индивидуальных (*б, в*):
1, 2 — роторы; *3* — фрикционные шестерни; *4* — приводные шестерни; *5* — вал трансмиссии; *6, 8* — муфты; *7* — электродвигатель; *9* — редуктор; *10* — блок-редуктор; *11* — шарнирные муфты.

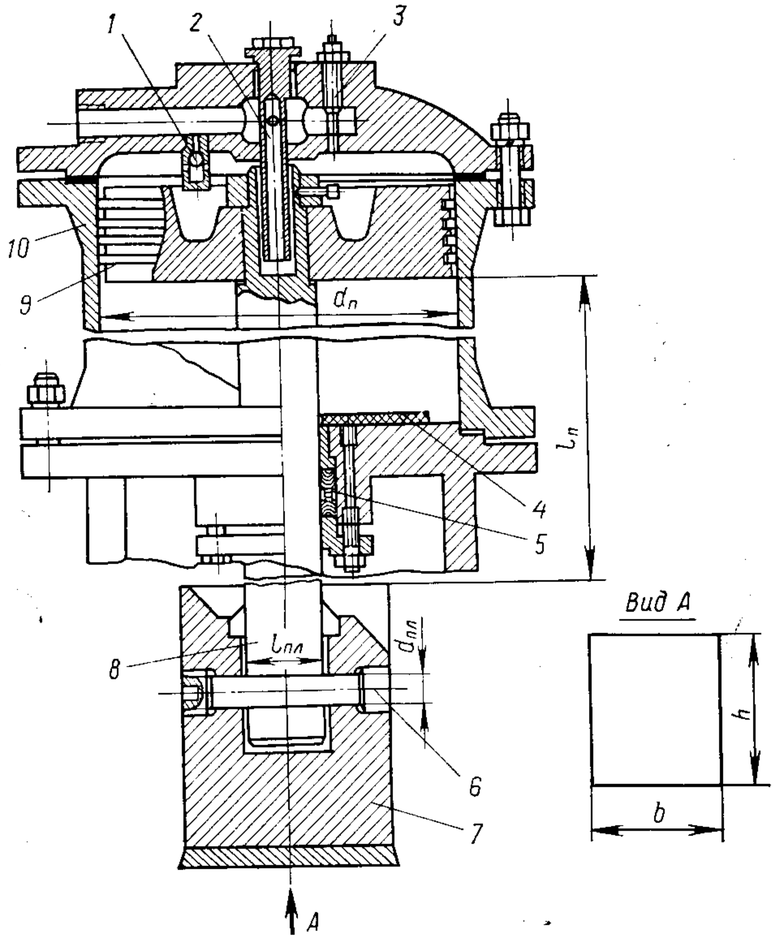


Рис. 10.14. Верхний затвор с пневмоцилиндром:
1 — обратный клапан; *2* — втулка; *3* — дроссель; *4* — буфер; *5* — уплотнение; *6* — палец; *7* — верхний затвор; *8* — шток; *9* — поршень; *10* — пневмоцилиндр.

дуктор *9* (рис. 10.13, *б*) или через универсальный блок-редуктор (рис. 10.13, *в*). С целью уменьшения нагрузки на роторы и их подшипники фрикционные и приводные шестерни размещены в блок-редукторе, а передача крутящего момента на роторы со стороны привода осуществляется с помощью универсальных шарнирных муфт *11*. Эти муфты допускают перекос и смещение тех валов, между которыми они установлены.

Устройства для загрузки двухроторных смесителей состоят из загрузочной воронки *1* (см. рис. 10.1) и запирающего устройства, состоящего из пневмоцилиндра и верхнего затвора.

Схема *верхнего загрузочного устройства* представлена на рис. 10.14. Верхний затвор *7* представляет собой чугунную плиту, соединенную пальцем *6* со штоком *8* поршня *9*, расположенного в пневмоцилиндре *10*. В крышке цилиндра *10* имеются устройства, обеспечивающие подачу сжатого воздуха в цилиндр и исключающие удар поршня в верхнем положении о крышку. Этими устройствами являются: обратный клапан *1*, втулка *2*, воздушный регулируемый дроссель *3*. Резиновый буфер *4*

смягчает удар поршня о днище пневмоцилиндра. Манжетное уплотнение *5* предотвращает попадание пыли в пневмоцилиндр.

Конструктивный расчет механизмов верхнего загрузочного устройства сводится к определению размеров пневмоцилиндра с учетом прочности и технологичности изготовления, его крышки, болтов крепления крышки к пневмоцилиндру и фланцевого соединения, а также к расчету на прочность штока и крепления затвора на штоке.

Поршень через шток передает на затвор усилие $P_з$, необходимое для поддержания в смесительной камере давления $p_к$, величина которого определяется ГОСТ 11996—79 (см. табл. 10.1). Площадь основания затвора определяется как $F_з = hb$, где h и b — высота и ширина основания затвора. Значения h и b выбираются по данным табл. 10.2 при условии $h = l_1$, $b = L_к$ или по приближенным соотношениям $h : b = 2{,}3 \div 2{,}4$.

Из очевидных условий равновесия

$$P_з = p_к F_з = p_п \pi d_п^2 / 4 \qquad (10.35)$$

Внутренний диаметр пневмоцилиндра $d_п$ вычисляется по известному давлению воздуха на поршень $p_п$, равному 0,5—0,8 МПа. Пневмоцилиндры диаметром $d_п > 300$ мм выполняются из стали сварно-литыми, имеющими среднюю часть в виде стальной бесшовной трубы или поковки.

Расчет толщины стенки цилиндра может быть произведен по методике, изложенной в разд. 3.3.2, для толстостенных цилиндров. Для толщины стенки δ тонкостенных цилиндров ($\delta/d_п \leqslant 0{,}1$) предлагается следующая формула:

$$\delta = p_п d_п / (2[\sigma]\varphi_R - p_п) + C \qquad (10.36)$$

здесь $p_п$ — рабочее давление в цилиндре; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала цилиндра ($[\sigma] = \sigma_в / n_в$, где $\sigma_в$ — предел прочности; $n_в$ — запас прочности, равный $n_в = 3$); φ_R — коэффициент прочности продольного сварного шва; C — прибавка на коррозию.

Сила $P_ш$, действующая вдоль штока, равна

$$P_ш = P_з + G_п \qquad (10.37)$$

где $G_п$ — вес верхнего затвора.

Напряжение смятия пальца составляет

$$\sigma_{см} = P_р / (d_{пл} l_{пл}) < [\sigma_{см}) \qquad (10.38)$$

где $P_р$ — расчетное значение силы, действующей вдоль штока; $d_{пл}$ и $l_{пл}$ — диаметр и рабочая длина пальца; $[\sigma_{см}] = (0{,}25 \div 0{,}3)\sigma_в$.

Силу $P_р$ находят по формуле

$$P_р = K_р P_ш \qquad (10.39)$$

где $K_р$ — коэффициент динамичности, равный 1,5.

Выгрузка приготовленной смеси осуществляется через отверстия, размещенные, как правило, в нижней части смесительной камеры. В смесителе типа Бенбери (см. рис. 10.1) разгру-

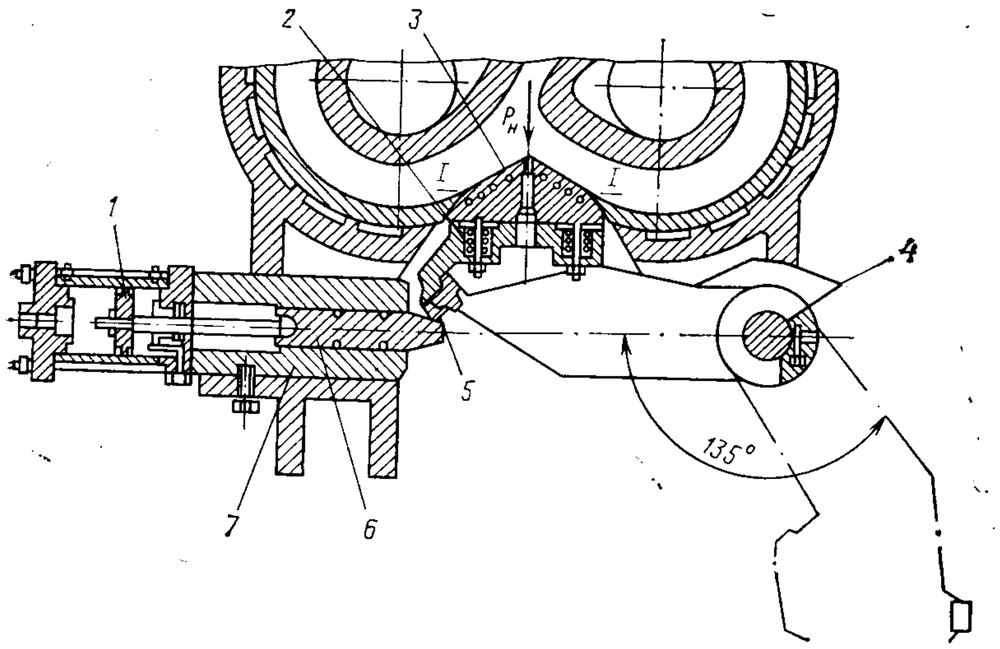


Рис. 10.15. Нижний затвор с гидроприводом:
1 — поршень; *2* — опора; *3* — плита; *4* — вал; *5* — ролики; *6* — клиновидная плита; *7* — направляющая рама.

зочное окно закрывается скользящей дверцей *8*, перемещаемой с помощью пневмоцилиндра *9*. В ряде современных конструкций *нижний затвор* во избежание заклинивания скользящей дверцы в направляющих выполнен в виде откидной крышки с гидроприводом (рис. 10.15). Основным конструктивным элементом механизма является конусообразная запорная плита *3*, укрепляемая через амортизирующие прокладки на опоре *2*. Запорная плита и опора поворачиваются на 135° гидромотором, соединенным с валом *4*. Для удержания плиты в закрытом состоянии предусмотрены ролики *5*, прижимаемые клиновидной плитой *6*. Плита *6* установлена в направляющей раме *7* и приводится в действие от поршня *1* вспомогательного гидроцилиндра.

Прочностной расчет нижнего затвора включает в себя определение напряжений в элементах конструкции от изгибающего момента, возникающего в результате действия усилия $P_н$. Величина $P_н$ определяется как произведение давления $p_{макс}$ [см. формулу (10.7)] на площадь поперечного сечения запорной плиты плоскостью *I—I* (см. рис. 10.15).

10.1.6. Регулирование теплового режима работы резиносмесителя

При смешении каучука с ингредиентами за счет возникновения значительных сдвиговых деформаций и напряжений выделяется большое количество тепла, что приводит к интенсивному повышению температуры смеси. При значительной массе перерабатываемого материала (до 150—200 кг), малой поверхности

теплоотвода и низкой температуропроводности ($a=0{,}00046$ м²/ч) температура смеси резко повышается. С целью предотвращения нагрева резиновой смеси выше предельной температуры, устанавливаемой регламентом технологического режима смешения, корпус смесительной камеры, роторы, верхний и нижний затворы охлаждаются водой.

Применяются два типа охлаждения ротора (рис. 10.16): закрытое и открытое. В *закрытой системе* (рис. 10.16, *а*) вода поступает во внутреннюю полость ротора *1* по трубе *2* и далее выводится через уплотняющий узел *3*. В *открытой системе* (рис. 10.16, *б*) вода для охлаждения также поступает по трубе *2* и разбрызгивается через форсунки *4*, имеющие щели прямоугольного сечения. Слив воды, заполняющей объем внутренней полости ротора лишь наполовину, осуществляется через воронку *5*.

Полукамеры резиносмесителя охлаждаются путем разбрызгивания воды, поступающей на их наружную оребренную поверхность.

Для определения количества воды, необходимого для охлаждения роторов и стенок смесительной камеры, необходимо вычислить количество тепла $Q_с$, выделяющегося в процессе смешения в единицу времени:

$$Q_с = Ak_м\eta_р W_{дв} \qquad (10.40)$$

где A — тепловой эквивалент работы; $k_м$ — коэффициент, использования полезной мощности ($k_м=0{,}75$); $\eta_р$ — к. п. д. привода; $W_{дв}$ — мощность двигателя привода.

Уравнение теплового баланса, учитывающее подводимое и отводимое тепло, можно представить в виде

$$Q_с = Q_1 + Q_2 + Q_3 \qquad (10.41)$$

Слагаемое Q_1 — количество теплоты, уносимое выгружаемой

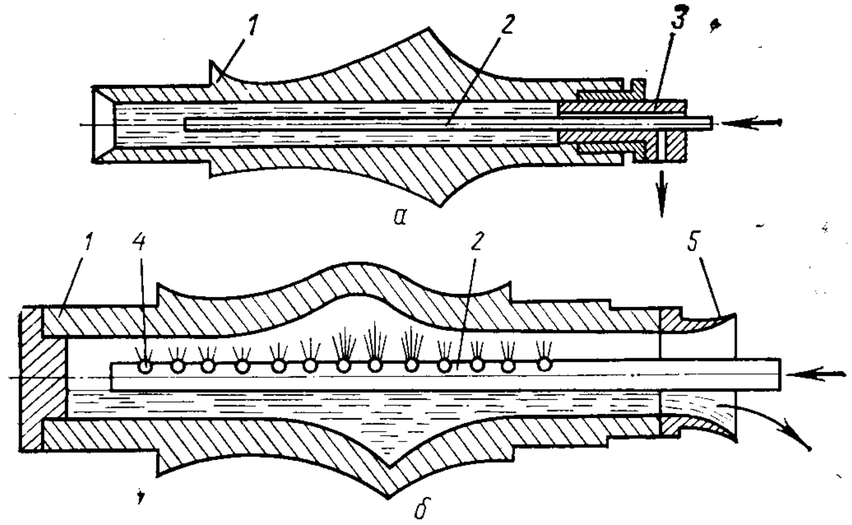


Рис. 10.16. Закрытая (*а*) и открытая (*б*) системы охлаждения роторов:
1 — ротор; *2* — труба; *3* — узел уплотнения; *4* — форсунки; *5* — воронка.

резиновой смесью, — равно

$$Q_1 = G_м c (T_н - T_к)$$

где $G_м$ — масса смеси; c — удельная теплоемкость смеси; $T_н$ и $T_к$ — начальная и конечная температуры смеси.

Слагаемое Q_2 — количество теплоты, отданное в окружающую среду лучеиспусканием ($Q_л$) и конвекцией ($Q_к$):

$$Q_2 = Q_л + Q_к$$

Слагаемое Q_3 — количество теплоты, уносимое охлаждающей водой:

$$Q_3 = W_в c_в (T_2 - T_1) \qquad (10.42)$$

где $W_в$ — расход воды на охлаждение; $c_в$ — удельная теплоемкость воды; T_1 и T_2 — температуры воды на входе и выходе из резиносмесителя (для современных систем охлаждения $T_1 = 285 \div 290$ К, $T_2 = 323 \div 333$ К).

Существует следующее приблизительное соотношение между составляющими уравнения теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 \approx Q_с/6 + Q_с/7$$

10.2. РЕЗИНОСМЕСИТЕЛИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Резиносмесители непрерывного действия работают следующим образом: в цилиндре, представляющем смесительную камеру, вращаются смесительные рабочие органы, перемешивающие смесь и продвигающие ее из зоны загрузки в зону выталкивания. Использование таких смесителей позволяет практически отказаться от вспомогательных операций цикла смешения (загрузки и выгрузки), увеличить производительность и уменьшить капитальные затраты. Основным недостатком смесителей непрерывного действия является высокая чувствительность к точности дозирования и равномерности подачи исходных материалов.

Смесители непрерывного действия можно разделить на две группы: червячные и роторные. Конструкция рабочих органов смесителей обеих групп должна обеспечивать интенсификацию процесса смешения путем создания максимальной площади контакта компонентов при смешении и необходимой деформации сдвига.

Резиносмесители непрерывного действия *червячного типа* бывают одно-, двух-, и многочервячными. Одночервячный резиносмеситель (рис. 10.17) предназначен для работы в одной технологической линии с резиносмесителем периодического действия, который осуществляет первую стадию смешения. Корпус резиносмесителя состоит из нескольких секций, выполняющих различные технологические функции. Перемешиваемый материал непрерывно поступает через загрузочное отверстие, оснащенное толкателем *9*, в пространство между червяком *4* и корпусом *1* загрузочной секции. Червяк *4* и гильза *2* имеют в зоне

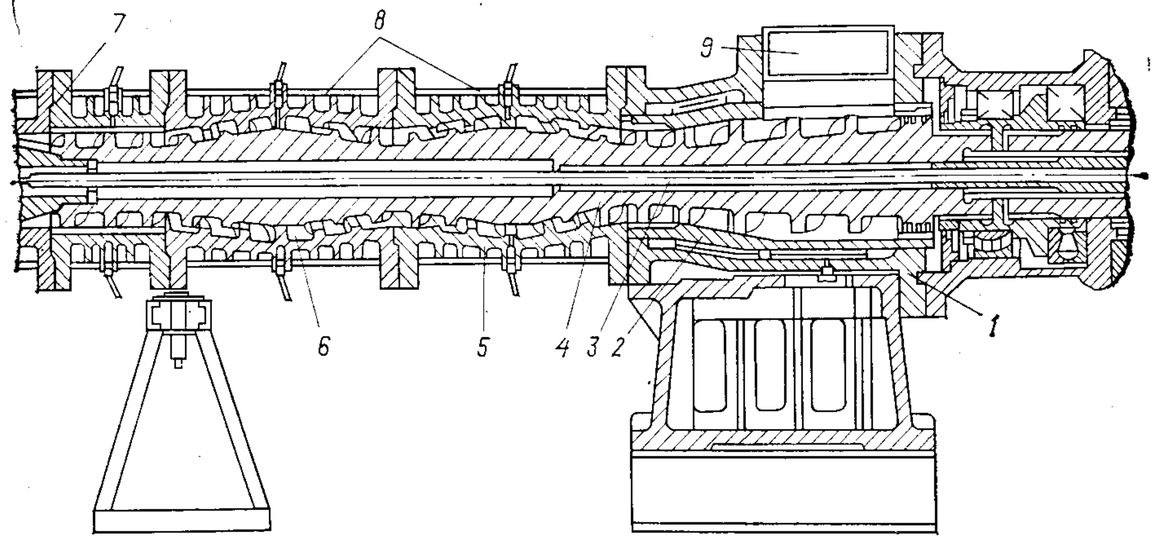


Рис. 10.17. Схема одночервячного резиносмесителя непрерывного действия:
1 — корпус; *2* — гильза; *3* — система охлаждения; *4* — червяк; *5* — секция смешения *I*; *6* — секция смешения *II*; *7* — секция выдавливания; *8* — рубашка охлаждения; *9* — толкатель.

загрузки материала коническую форму, благодаря чему при вращении червяка происходит интенсивное сжатие материала и его нагнетание в первую секцию смешения *5*, стенки корпуса которой также оснащены нарезкой. Повышение интенсивности смешения достигается за счет переходов смеси из межвиткового пространства червяка в нарезку корпуса и последующего возврата к нарезке червяка. При прямом и обратном переходах часть смеси задерживается и смешивается с вновь поступающей порцией. Таким образом, кроме обычной для одночервячных машин траектории движения частиц материала в данной конструкции появляется перемещение частиц в направлении, перпендикулярном оси червяка, что усиливает смесительный эффект. Для улучшения перемешивающего воздействия на материал в резиносмесителе имеется вторая аналогичная секция смешения *6*, предшествующая секции выдавливания *7*.

Для отвода излишних тепловыделений корпус червячной машины снабжен рубашкой охлаждения *8* и системой охлаждения червяка *4*.

Интенсивность смешения и диспергирования материала зависит от числа секций смешения, конструкции нарезки, величины зазоров между гребнями нарезки червяка и других факторов.

Использование двух- и многочервячных смесителей способствует усилению перемешивающего воздействия и с этой точки зрения является перспективным.

Примером машины непрерывного действия *роторного типа* может служить резиносмеситель типа ФКМ «Фаррел» (рис. 10.18). Этот смеситель состоит из двух роторов фасонного типа *4* (рис. 10.18, *а*), вращающихся от привода *3* в корпусе *1*.

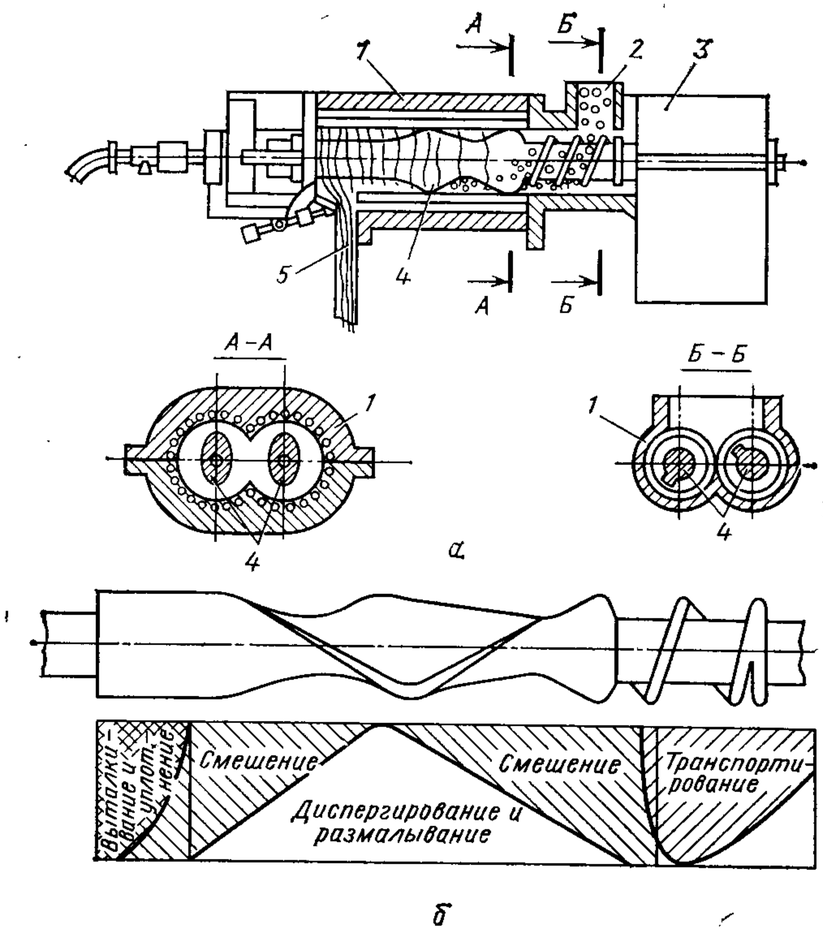


Рис. 10.18. Двухроторный резиносмеситель непрерывного действия типа ФКМ «Фаррел»:

а — конструктивная схема (*1* — корпус, *2* — загрузочная воронка, *3* — привод, *4* — роторы, *5* — разгрузочное отверстие); *б* — схема протекания различных процессов смешения в роторе.

Ингредиенты смеси автоматически поступают в агрегат через загрузочную воронку *2* и подаются нарезкой зоны транспортирования ротора в зону смешения (рис. 10.18, *б*). В этой зоне материал подвергается различным видам обработки: размалыванию и диспергированию при интенсивных сдвиговых воздействиях благодаря особой геометрии роторов, смешению и поперечному перемещению из одной части камеры в другую. При достижении определенной степени гомогенности смеси масса выталкивается из смесителя через разгрузочное отверстие *5* с регулируемым (подобно клапану) сечением. Размеры разгрузочного отверстия определяют эффективный рабочий объем камеры смешения, а их изменение позволяет регулировать температуру смеси и удельную энергию смешения.

При конструировании резиносмесителей непрерывного действия особое внимание уделяется системам дозирования и питания. Для обеспечения необходимой точности дозирования компоненты должны подаваться в резиносмеситель в виде порошков, гранул или в жидком состоянии. Дозирование сыпучего сырья осуществляется дозаторами непрерывного действия, состоящими из бункера, питателя, весового устройства. Для дозирования жидких и вязких компонентов используются объемные дозаторы. Наиболее труднорешаемой проблемой является поддержание постоянного соотношения подаваемых компонентов в любой момент времени. Оснащение смесителей системой автоматического контроля и управления дозированием позволяет тщательно регистрировать и регулировать расход каждого из компонентов смеси.

Теория работы резиносмесителей непрерывного действия находится еще в стадии изучения, поэтому выбор конструктивных параметров оборудования проводится экспериментальным путем с использованием методов размерного анализа, теории подобия и моделирования процессов на лабораторных установках, геометрия рабочих органов которых подобна проектируемым.

10.3. СТАНКИ ДЛЯ СБОРКИ ШИН

10.3.1. Типы покрышек и методы их сборки

Пневматическая *шина* представляет собой резинокордовую упругую оболочку, наполненную сжатым воздухом и укрепленную на ободе колеса. В зависимости от устройства шины бывают камерные и бескамерные, а по расположению нитей корда в каркасе подразделяются на шины с перекрестным направлением расположения нитей корда (диагональные), с радиальным расположением нитей корда (типа Р) и со съемным протектором (типа РС). Одним из основных элементов пневматической шины является *покрышка*.

Основными частями диагональной покрышки (рис. 10.19) являются каркас, два борта, брекер, протектор и две боковины. Каркас *5* является основой покрышки, которая придает ей прочность, гибкость и упругость. Каркас состоит из ряда слоев обрезиненного корда, который воспринимает бóльшую часть нагрузки, действующей на автомобильную шину. Борт покрышки представляет собой ее жесткую нерастягивающуюся часть, с помощью которой шина крепится на ободе. Бортов у покрышки два; каждый из них образован из бортовых лент *8*, крыльевых лент *9*, обернутых вокруг слоев корда бортового кольца *10*. Край борта, соприкасающийся с закраиной обода, называется пяткой *3*, а край, обращенный внутрь колеса, — носком *1*. К посадочной поверхности обода прилегает часть борта, называемая подошвой *2*. Брекер (подушечный слой) *6* является резиновой прослойкой, смягчающей толчки и удары, передаваемые от протектора *4* к каркасу. Протектор располагается поверх брекера и служит для обеспечения сцепления шины с грунтом дороги. Боковины *7* предохраняют боковые стенки каркаса от механических повреждений.

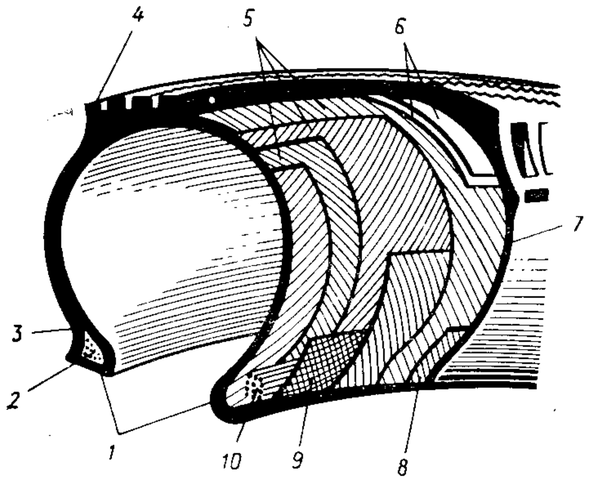


Рис. 10.19. Автомобильная покрышка с диагональным расположением нитей корда:
1 — носок; *2* — подошва; *3* — пятка; *4* — протектор; *5* — каркас; *6* — брекер; *7* — боковина; *8* — бортовая лента; *9* — крыльевая лента; *10* — бортовое кольцо.

Существуют три основных способа сборки покрышек: браслетный, послойный и комбинированный. Все эти способы имеют целью сборку из различных деталей, составляющих готовую покрышку, ее полуфабриката, поступающего в дальнейшем на формование и вулканизацию. *Браслетный способ* сборки предусматривает предварительное изготовление готовых каркасных и брекерных браслетов, состоящих из нескольких слоев корда, которые последовательно надеваются на сборочный барабан и прикатываются. При *послойном способе* на барабан одеваются отдельные слои обрезиненного корда и брекера, которые затем подвергаются прикатке. *Комбинированный способ* отличается тем, что одни детали для каркаса поступают в виде слоев, а другие — в виде браслетов.

В шинной промышленности используется классификация методов сборки в зависимости от конструкции сборочного барабана, служащего для сборки покрышки тем или иным способом: методы сборки на дорновом, полудорновом и полуплоском барабанах (рис. 10.20). *Дорновый способ* (рис. 10.20, *а*) характеризуется тем, что покрышка *2* в процессе сборки приобретает тороидальную форму дорнового барабана *1*, т. е. близкую к той, которую она имеет после вулканизации в готовом виде. Этот способ отличается трудоемкостью и технологической сложностью, поэтому он не получил распространения.

Полудорновый способ (рис. 10.20, *б*) заключается в том, что бóльшая часть покрышки формуется на полудорновом барабане *3* в виде кольца. Лишь бортовая часть с крыльями собирается на заплечиках *4* в том положении, в котором она будет находиться в готовом изделии. После сборки покрышка формуется, т. е. ей придается тороидальная форма. Ввиду большой трудоемкости формования борта этот метод имеет ограниченное применение.

При *полуплоском способе* (рис. 10.20, *в*) форма собранной покрышки получается еще более плоской, чем при сборке полудорновым способом. При сборке требуется значительно бóльшая деформация каркаса при формовании, чем в полудорновом способе.

Универсальные сборочные станки предусматривают проведение процесса сборки как полуплоским, так и полудорновым методами — самыми распространенными в промышленности.

Процесс сборки диагональной покрышки может осуществляться браслетным или послойным методом за один прием (в одну стадию) на барабанах полуплоского или полудорнового типов. Сборка покрышек радиального типа ввиду специфики их конструкции и наличия нерастяжимого брекерного пояса проводится в одну стадию на специальном дорне (тороидальном барабане) или в две стадии на двух различных станках. На первом станке происходит сборка каркаса радиальной покрышки, на втором осуществляется полная сборка, выполняемая на барабанах с изменяющимися в процессе сборки параметрами (в частности, диаметром).

10.3.2. Конструкция сборочных станков

Сборочный станок представляет собой агрегат, состоящий из объединенных общей рамой механизмов: хранения и подачи деталей и заготовок, их центрирования и наложения друг на друга, формования, прикатки, привода и системы управления. Сборочные станки для автопокрышек, несмотря на различия в технологии и методах сборки, в конструктивном исполнении отдельных механизмов, имеют практически однотипную компоновку. В качестве примера рассмотрим общее устройство станка, предназначенного для сборки покрышек на полуплоском барабане с бортом диаметром от 300 до 406 мм (рис. 10.21). К основным узлам станка относятся: правая станина (группа) *1*, левая станина (группа) *4*, главный вал *16* с бараба-

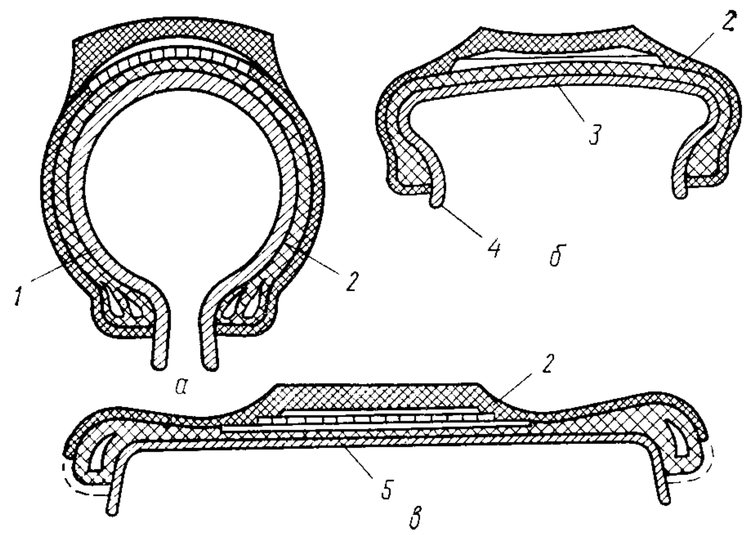


Рис. 10.20. Поперечное сечение покрышек, собранных на дорновом (*а*), полудорновом (*б*) и полуплоском (*в*) барабанах:
1 — дорновый барабан; *2* — покрышка; *3* — полудорновый барабан; *4* — заплечики; *5* — полуплоский барабан.

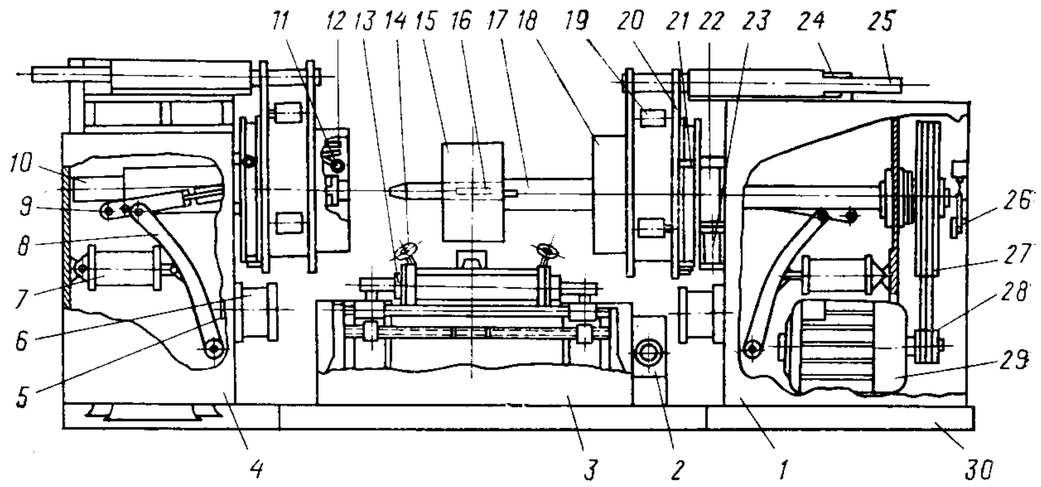


Рис. 10.21. Станок для сборки покрышек на полуплоском барабане:

1 — правая станина; *2* — привод; *3* — механизм нижних прикатчиков; *4* — левая станина; *5* — пневмофиксатор; *6* — привод пневмофиксатора; *7* — пневмоцилиндр; *8* — рычаг; *9* — тяга; *10* — выдвижной вал; *11* — механизм обработки борта; *12* — шаблоны; *13* — вал прикатчика; *14, 19, 21* — ролики; *15* — сборочный барабан; *16* — главный вал; *17* — тормозная труба; *18* — дополнительный барабан; *20* — плита; *22* — тормоз; *23* — опора; *24* — пневмопривод; *25* — направляющая; *26* — выключатель; *27, 28* — шкивы; *29* — электродвигатель; *30* — рама станин.

ном *15*, механизм обработки борта *11*, дополнительный барабан *18*, механизм нижних прикатчиков *3*.

Правая группа *1* представляет собой сварную конструкцию коробчатого типа, в которой размещены асинхронный двигатель *29*, клиноременная передача *27*, *28* привода главного вала *16*. Соосно с главным валом расположены тормозная трубка *17* с колодочным тормозом *22*, установленным на станке. Дополнительные барабаны *18* находятся справа и слева от сборочного барабана и имеют возможность передвигаться по направляющим *25* с помощью пневмопривода *24*. Выдвижной вал *10* левой группы служит для соединения с главным валом при обработке борта на левом дополнительном барабане. В станине левой группы закреплен привод обработки борта, состоящий из пневмоцилиндра *7*, рычага *8*, тяги *9*, соединенной с механизмом обработки борта *11*. Пневмофиксатор *5* с приводом *6* служит для обеспечения автоматического цикла работы механизма обработки борта. В правой группе (станине) имеется аналогичный механизм обработки второго борта покрышки с пневмоприводом. Под сборочным барабаном расположены прикатчики, состоящие из привода *2*, вала *13* и роликов *14*.

Порядок выполнения сборочных операций на станке следующий. На шаблон *12* надеваются крылья покрышки, и складывающийся сборочный барабан развертывается (раскрывается) в рабочее положение. В заплечики главного барабана вводятся дополнительные барабаны до упора, и производится накладка слоев корда при вращении барабана с частотой 1 об/мин. После прикатки слоев корда дополнительные барабаны отводятся, и механизмы обработки обжимают слои корда на неподвижном

барабане с помощью рычагов и кольцевой пружины. Далее производится посадка крыла и после отведения шаблонов рычаги с кольцевой пружиной заворачивают слои корда на цилиндрическую часть барабана: эти слои прикатываются механизмом прикатчика. После складывания сборочного барабана левая группа механизмов отводится по направляющим, расположенным перпендикулярно оси сборочного барабана, и покрышка снимается.

Типоразмеры и основные параметры сборочных станков регламентированы ГОСТ 15940—80 и приведены в табл. 10.4.

Тип станка в пределах каждого габарита может иметь несколько модификаций. Станки для сборки на полуплоском барабане обозначаются СПП, для сборки на полудорновом барабане — СПД.

Установленная ГОСТ 15940—80 система условных обозначений сборочных станков содержит значительное количество данных о конструктивных особенностях оборудования. Например, условное обозначение СПП 1—400/300—360Ш — 120/320—330—500П относится к станку для сборки покрышек на полуплоском барабане первого габарита, с диаметром барабана 400 мм, диапазоном ширины барабанов 300—360 мм, шарнирно-рычажным механизмом складывания барабана (типа Ш), расстоянием от торца барабана до кромки группы слоев корда 120 мм, диапазоном диаметров рабочих поверхностей устройств

Таблица 10.4. Типоразмеры и основные параметры станков для сборки покрышек пневматических шин

Тип станка	Габарит станка	Диаметр барабана, мм*	Ширина барабана, мм*	Ширина слоя (группы слоев) корда, мм (не более)	Расстояние от торца барабана до кромки группы слоев корда, мм (не более)	Диаметр рабочих поверхностей устройств для посадки крыльев, мм (не более)**	Посадочный диаметр вала под барабан, мм
СПП	1	230/560	150/560	960	200	510/200	30, 50
	2	560/1150	400/1000	1600	300	1080/510	70, 100, 175
СПД	1	240/520	150/700	1250	210	380/200	30, 50
	2	520/720	300/1200	1800	300	580/380	70
	3	720/1000	400/1300	2100	410	860/480	70, 100, 110
	4	1000/1300	800/1900	3000	550	900/500	100, 110, 170
	5	1300/1600	1000/1500	3000	630	990/840	120, 170
	6	1600/1800	1200/2100	3800	840	1360/990	120, 170
	7	1800/2300	1800/2500	4500	1000	1480/1140	200, 250

* В числителе — минимальные, в знаменателе — максимальные значения.
** В числителе — максимальные, в знаменателе — минимальные значения.

для посадки крыльев 320—330 мм, шириной слоя корда 500 мм и послойным методом сборки.

Сборочные станки комплектуются питателями — устройствами для хранения и подачи деталей на сборочный барабан.

10.3.3. Сборочные барабаны

Сборочный барабан является одним из основных узлов станка, в значительной мере определяющим качество собираемых покрышек, возможность механизации технологических операций их изготовления и съема, улучшения условий и повышения производительности труда. В настоящее время имеется значительное число конструктивных разновидностей сборочных барабанов, предназначенных для сборки покрышек с диагональным и радиальным расположением корда. Рассмотрим наиболее характерные конструкции этих механизмов.

Четырехсегментный сборочный барабан полуплоского типа (рис. 10.22) состоит из четырех сегментов *14*, которые в развернутом положении образуют цилиндрическую поверхность. Сегменты с помощью шарниров укреплены на крестовине *3* и после развертывания закрепляются рычагами *11* и *10*. Рычажная муфта *5* служит другой шарнирной опорой для этих рычагов. Крестовина *3* жестко закреплена на главном валу станка, а муфта *5* — на полом валу станка *6*. Таким образом положение сегментов *14* (развернутое или сложенное) зависит от взаимного расположения крестовины *3* и рычажной муфты *5*. При развертывании барабана защелки *2* фиксируют взаимное положение крестовины и рычажной муфты. Резиновые амортизаторы *13* предотвращают удар деталей друг о друга при складывании барабана. После складывания барабана наибольший диаметр описанной окружности сложенного барабана должен быть меньше диаметра бортовой части, тогда покрышка легко снимается с барабана и поступает на формование.

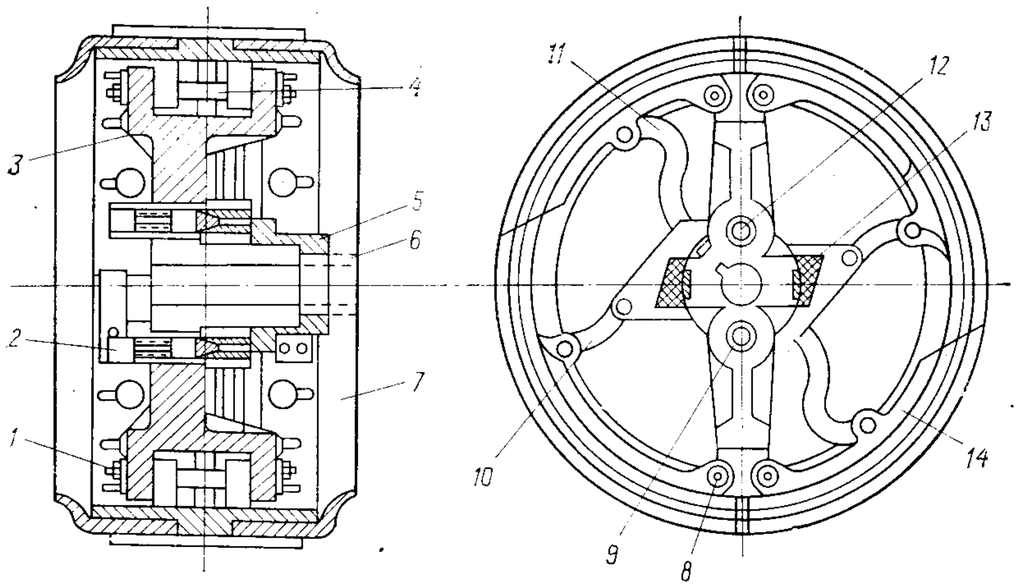


Рис. 10.22. Полуплоский четырехсегментный сборочный барабан:
1 — устройство для смазки осей; *2* — защелка; *3* — крестовина; *4, 8, 9, 12* — оси; *5* — рычажная муфта; *6* — полый вал; *7* — боковина плоскости сегмента; *10, 11* — рычаги; *13* — резиновый амортизатор; *14* — сегмент.

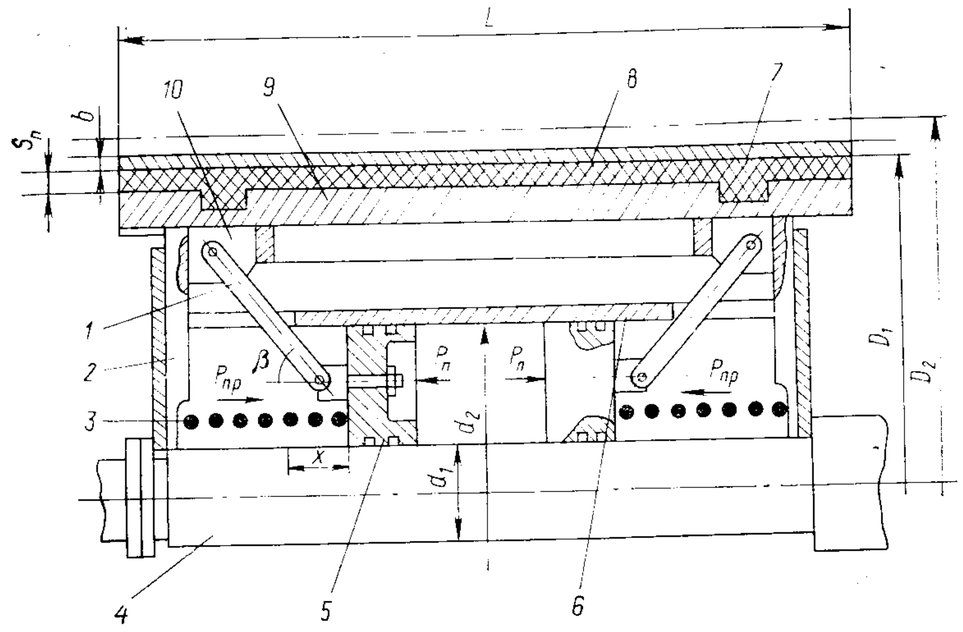


Рис. 10.23. К расчету механизма «разжатия» сборочного барабана:
1 — рычаг; *2* — крышка; *3* — пружина; *4* — вал; *5* — поршень; *6* — пневмоцилиндр; *7* — оболочка; *8* — браслет; *9* — планка; *10* — ползун.

Четырехсегментный барабан широко используется в промышленности наряду с его модификацией — шестисегментным. Полудорновый барабан принципиально отличается от полуплоского наличием съемных плечиков для установки бортовых колец в неизменяемом заданном положении. Распространены рычажно-шарнирные конструкции полудорновых барабанов с инерционным принципом действия механизма складывания барабана.

В последнее время получили распространение так называемые *«разжимные» сборочные барабаны* с пневморычажным приводом. Основным отличием процесса сборки на этом барабане является изменение в ходе работы его диаметра. Конструкция такого барабана представлена на рис. 10.23. Он состоит из сегментных планок *9*, закрепленных на ползунах *10*, образующих в сжатом состоянии барабана цилиндр. Эластичная резиновая оболочка *7* служит для равномерного растягивания обрезиненного корда по поверхности барабана. Для «разжатия» имеется пневморычажный привод, включающий в себя пневмоцилиндр *6* с двумя поршнями *5*, связанными с рычагами *1*. Между поршнями *5* и крышками *2* установлены пружины *3* возврата поршней. Воздух в полости между поршнями *5* подается по трубке, проходящей внутри вала *4*. При подаче сжатого воз-

духа в полость между поршнями *5* последние начинают расходиться, сжимая пружины *3*, а рычаги *1* разводят ползуны *10* с планками *9*.

В процессе сборки покрышки барабан данной конструкции помимо функции приспособления, облегчающего сборку, приобретает функцию рабочего органа, осуществляющего соединение деталей покрышки путем их растяжения и создания в них упругих сил, которые способствуют соединению деталей за счет адгезии.

Расчет механизма «разжатия» такого барабана включает определение усилия $P_п$, развиваемого поршнем *5* в процессе сборки. Условием работоспособности рассматриваемого механизма является неравенство вида

$$2P_п > (P_м + P_{рп})/\mathrm{tg}\,\beta + 2P_{пр} + 2P_{тр} \qquad (10.43)$$

где $P_м$ и $P_{рп}$ — силы воздействия на барабан со стороны материала деталей покрышки и резиновой эластичной оболочки; β — геометрический параметр (см. рис. 10.23); $P_{пр}$ — усилие, развиваемое пружиной; $P_{тр}$ — потери усилия $P_п$ на трение.

Для расчета величин, входящих в неравенство (10.43), можно использовать следующие уравнения.

Для расчета $P_п$:

$$P_п = \pi (d_2^2 - d_1^2)\, p_в/4 \qquad (10.44)$$

где d_1 и d_2 — внутренний и внешний диаметры пневмоцилиндра *6* (см. рис. 10.23); $p_в$ — давление в пневмосистеме ($p_в$=0,4÷0,6 МПа).

Для расчета $P_м$:

$$P_м = P_{му} + P_{мт} \qquad (10.45)$$

где $P_{му}$ — сила упругости материала (обрезиненного корда); $P_{мт}$ — сила трения между материалом и поверхностью барабана.

Величина $P_{му}$ в (10.45) равна

$$P_{му} = 2bk_{1у}k_{2у}\varepsilon\pi L \qquad (10.46)$$

где b и L — толщина и ширина (начальные) браслета из материала на барабане; ε — относительная деформация растяжения материала, равная $\varepsilon = (D_2 - D_1)/D_1$ (здесь D_1 и D_2 — начальный и конечный диаметры браслета).

Величины $k_{1у}$ и $k_{2у}$ в уравнении (10.46) составляют

$$k_{1у} = E/(1 - \mu^2); \qquad k_{2у} = 1 - \mu/\mathrm{tg}^2\,\alpha \qquad (10.47)$$

где E — модуль упругости материала; μ — коэффициент Пуассона материала; α — угол, образуемый нитями корда и линией, перпендикулярной образующей барабана.

Величина $P_{мт}$ в (10.45) равна

$$P_{мт} = \frac{4bk_{1у}k_{2у}\pi fL}{D_1}\left(\frac{L}{\mathrm{tg}^2\,\alpha} + \pi D_1\right)\varepsilon \qquad (10.48)$$

Для расчета $P_{рп}$:

$$P_{рп} = 2S_п\pi E\varepsilon L/(1 - \mu^2) \qquad (10.49)$$

где $S_п$ — толщина эластичной оболочки.

Для расчета $P_{пр}$:

$$P_{пр} = [Gd^4_{пр}/(2D^4_{пр}n)]\,(\Delta + x) \qquad (10.50)$$

где G — модуль сдвига материала пружины; $d_{пр}$ — диаметр проволоки; $D_{пр}$ — средний диаметр витка пружины; n — число витков; Δ — первоначальное сжатие пружины; x — ход поршня.

Для расчета силы трения между поршнем и цилиндром $P_{тр}$ используется формула (3.7) при условии $P_{тр} = T_у$.

10.3.4. Привод барабанов

Привод сборочного барабана должен обеспечивать вращение в двух основных рабочих режимах — прикатки и наложения деталей. Чаще всего в качестве привода главного вала используется двухскоростной электродвигатель постоянного тока. Иногда применяется асинхронный двигатель специальной конструкции, предусматривающий работу в очень напряженном режиме, поскольку привод включается несколько сот раз в час.

В ряде современных конструкций сборочного оборудования используются электродвигатели с бесступенчатым регулированием частоты вращения, например с питанием от тиристорного преобразователя.

Вращение на главный вал передается через систему передач, в большинстве случаев — клиноременных.

Частота вращения $N_{вI}$ вала *16* (см. рис. 11.21) в режиме прикатки слоев корда и других деталей находится по уравнению

$$N_{вI} = N_1 i_к M_s \qquad (10.51)$$

где N_1 — наибольшая частота вращения двигателя; $i_к$ — передаточное отношение клиноременной передачи; M_s — поправочный коэффициент проскальзывания ремня (M_s=0,97).

Для вычисления частоты вращения вала в режиме наложения деталей $N_{вII}$ в формулу (10.51) вместо N_1 подставляют значения N_2 — наименьшей частоты вращения вала электродвигателя.

10.3.5. Механизм обработки борта

После проведения технологических операций наложения и прикатки слоев обрезиненного корда начинается формирование бортовой части покрышки, осуществляемое специальными устройствами — механизмами обработки борта. Одна из конструкций такого механизма универсального назначения представлена на рис. 10.24. Механизм устанавливается в правой и левой группах станка соосно с главным валом и с помощью пневмоцилиндра *9* может перемещаться из исходного положения *I* в рабочее положение *II* и наоборот.

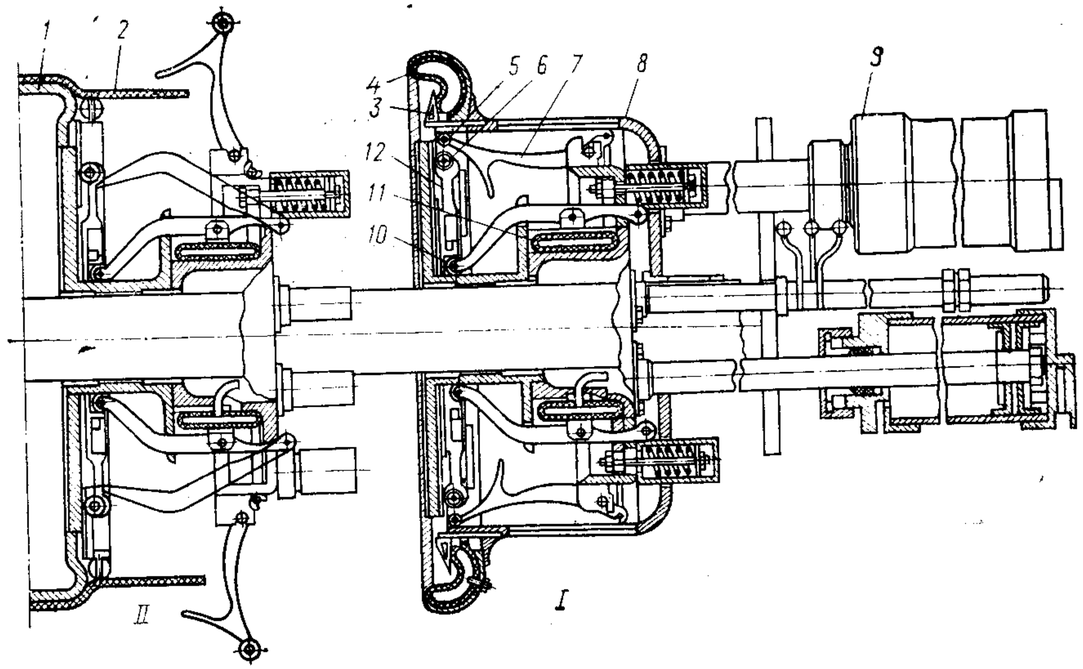


Рис. 10.24. Универсальный механизм формирования борта на полудорновом барабане (*I* — исходное, *II* — рабочее положения):

1 — сборочный барабан; *2* — крыло покрышки; *3* — захват; *4* — обжимная камера; *5* — ролик; *6* — кольцевая пружина; *7, 10* — рычаги; *8* — шаблон; *9* — пневмоцилиндр; *11* — камера; *12* — сектор.

Перед включением механизма происходит установка вручную крыла покрышки *2*, после чего при движении механизма из положения *I* в положение *II* рычаги *7* и *10* занимают исходное положение для захвата крыла покрышки, расположенного на сборочном барабане *1*. Формирование и обработка борта осуществляется рычагами *7* с роликом *5* и секторами *12* с кольцевой пружиной *6*. Обжимная камера *4* служит для опрессовки корда на заплечиках. Секторы и рычаги действуют синхронно в правом и левом механизмах и приводятся в движение сжатым воздухом, подводимым в камеру *11*, а также за счет воздействия на рычаги со стороны шаблона *8* и за счет кольцевой пружины *6*.

10.3.6. Механизм прикатчика

Качество покрышки зависит от тщательности прикатки деталей, собранных на барабане. В результате адгезии между деталями покрышки увеличивается их взаимное сцепление и устраняются складки и неровности поверхности. Для осуществления прикатки сборочные станки оснащаются прикатчиками цилиндрической и бортовой частей покрышек. Часто прикатчики конструируются как универсальные устройства, способные обрабатывать и бортовую, и цилиндрическую части покрышки. Схема универсального прикатчика показана на рис. 10.25. Металлический диск-ролик прикатчика *2* соединен с рычажной системой *4*, приводимой в действие пневмоцилиндрами *3*. Для осуществления прикатки ролик прикатчика подводится к поверхности покрышки и при включении вращения сборочного барабана катится по поверхности собранной покрышки, обрабатывая протектор и борт. Пневмоцилиндры *3* обеспечивают изменение положения прикатчика относительно поверхности барабана и развивают усилие прижатия, регулируемое подачей в пневмоцилиндры сжатого воздуха под различным давлением.

10.3.7. Линии сборки покрышек

Механизация трудоемких сборочных операций и автоматизация управления процессом сборки являются актуальной задачей, решение которой в современных шинных производствах достигается применением поточных линий сборки покрышек.

Линии сборки покрышек можно разделить на две наиболее распространенные разновидности: карусельного типа и поточного типа с импульсным перемещением сборочных барабанов. В *линиях карусельного* типа операции сборки выполняются на станках, установленных на поворотной платформе (карусели). В соответствии с технологической схемой производства станок перемещается от одного рабочего места к другому, где выполняются одна за другой операции сборки. Эти линии сборки не нашли широкого применения из-за громоздкости оборудования и большого числа трудоемких ручных операций.

Более рациональными по конструкции являются *поточные линии*, состоящие из отдельных операционных станков, объединенных транспортной системой перемещения сборочного барабана от одного станка к другому. Число участков (станков) сборки зависит от конструкций собираемых покрышек, числа слоев корда. Сборочные барабаны перемещаются цепным конвейером, на котором укреплены каретки, расстояние между ко-

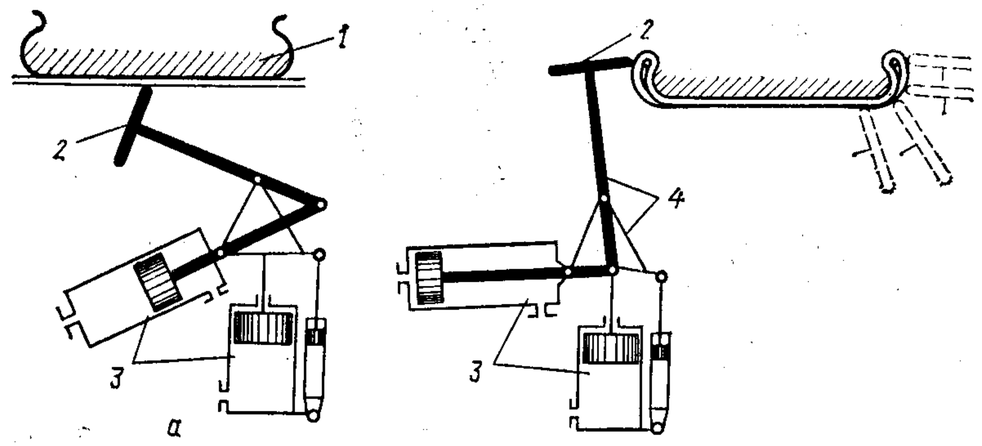


Рис. 10.25. Схема работы универсального прикатчика:

а — прикатка протектора; *б* — прикатка борта; *1* — сборочный барабан; *2* — диск-ролик; *3* — пневмоцилиндры; *4* — рычажная система.

торыми соответствует расстояниям между соседними участками линии.

Создание автоматизированных поточных линий сборки покрышек тесно связано с проблемой полного устранения ручного труда путем использования промышленных роботов и манипуляторов. Автоматизация основных и вспомогательных операций и сборки покрышек позволит значительно увеличить производительность труда в новых высокоэффективных технологических комплексах.

10.4. ВУЛКАНИЗАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОКРЫШЕК

10.4.1. Операции формования и вулканизации

При формовании покрышки собранной цилиндрической заготовке придается форма готовой покрышки. При этом достигается равномерное распределение натяжения нитей корда каркаса, являющееся основой высоких ходовых свойств покрышки.

С целью получения из заготовки сырой покрышки требуемой формы ее помещают в пресс-форму. При сближении полуформ пресс-формы в заготовку подают воздух под давлением, величина которого зависит от конструкции покрышки, материала каркаса и других факторов. Для малослойных покрышек давление воздуха при формовании составляет 0,15 МПа, для многослойных с жестким каркасом — до 0,4 МПа. Продолжительность операции формования определяется скоростью смыкания полуформ, наличием технологических пауз и для покрышек различной конструкции составляет от 1 до 5% продолжительности последующей, завершающей стадии производства — вулканизации изделий.

Процесс вулканизации заключается в нагреве сырой отформованной заготовки в пресс-форме, выдержке ее под давлением и при повышенной температуре в течение времени, необходимого для завершения протекания реакции вулканизации каучука. Температура и время вулканизации зависят от состава резиновой смеси и требуемых эксплуатационных свойств покрышек. Процесс вулканизации довольно продолжителен и составляет 15—80 мин (в зависимости от конструкции и габаритов покрышки).

Вулканизация протекает обычно при температуре 403—453 К. Тепловые потоки к покрышке стараются подводить равномерно к ее внутренней и наружной поверхностям. В качестве теплоносителей используются водяной насыщенный пар, перегретая вода, горячий воздух и инертные газы, а также высокотемпературные органические теплоносители. Вулканизацию проводят при повышенном давлении (0,3—2,5 МПа) с целью вытеснения из покрышки испаряющихся ингредиентов и получения однородной, беспористой структуры готового изделия.

10.4.2. Типы оборудования

Развитие специализированного оборудования для производства покрышек до недавнего времени шло по пути создания машин и агрегатов для раздельного проведения операций формования покрышки и ее последующей вулканизации. В отечественной шинной промышленности были распространены воздушные форматоры универсального назначения и различные виды вулканизационного оборудования: вулканизационные котлы, автоклав-прессы, индивидуальные вулканизаторы. Основным современным видом оборудования для совместного осуществления формования и вулканизации покрышек являются форматоры-вулканизаторы.

Вулканизационные котлы и *автоклав-прессы* относятся к вулканизационному оборудованию общего назначения, предназначенного для обработки не только автопокрышек, но и широкого ассортимента изделий технического и бытового назначения. Вулканизация изделий в этом оборудовании проводится в среде насыщенного пара или нагретого воздуха.

Индивидуальные вулканизаторы предназначены для вулканизации в пресс-формах предварительно сформованных покрышек. По сравнению с вулканизационными котлами и автоклав-прессами индивидуальные вулканизаторы обладают рядом преимуществ: создают возможность автоматического управления работой оборудования, облегчают условия труда и значительно снижают эксплуатационные расходы.

С созданием *форматора-вулканизатора* была устранена необходимость применения станка для предварительного формования покрышек и вспомогательного оборудования, что значительно сократило цикл изготовления покрышек, существенно облегчило условия труда. Однако конструкция форматоров-вулканизаторов имела существенный недостаток: продолжительность работы его наиболее сложных и дорогостоящих устройств — привода и механизма управления диафрагмой — составляла всего около 5% общего времени цикла вулканизации. Для устранения этого недостатка была реализована идея использования многопозиционного форматора-вулканизатора, имеющего несколько вулканизационных форм, обслуживаемых одним механизмом перезарядки.

10.4.3. Формующее оборудование

Универсальный воздушный форматор (рис. 10.26) предназначен для выполнения операции формования покрышки по следующей технологической схеме. Собранная заготовка покрышки *2* устанавливается на нижний стол форматора *7* и слегка придавливается перемещением верхнего стола *3*. Затем с целью расправления заготовки и предварительного натяжения нитей корда в нее подается сжатый воздух через гибкий шланг *6*. Далее

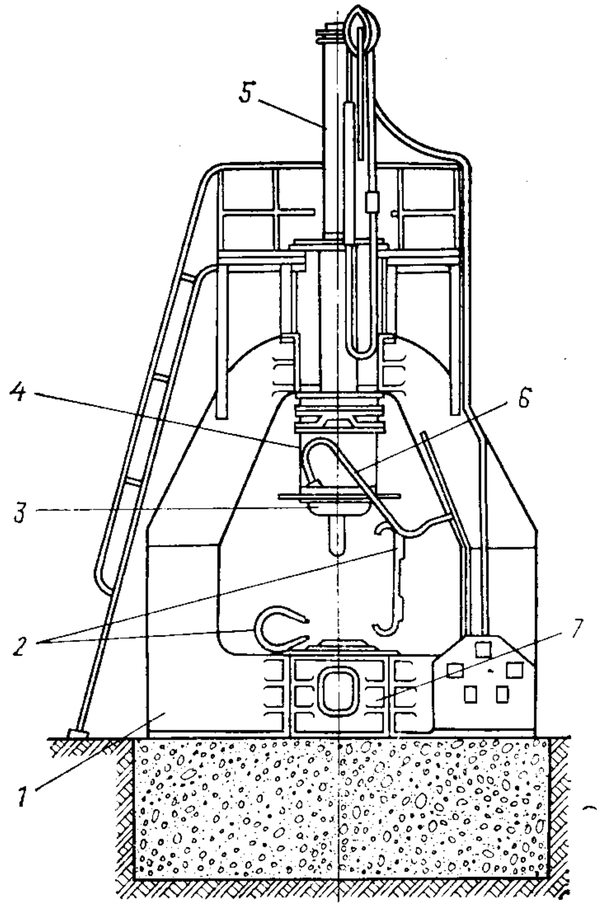


Рис. 10.26. Схема универсального воздушного форматора для покрышек:

1 — станина; *2* — заготовка покрышки; *3* — верхний стол; *4* — цилиндр; *5* — пневматический привод; *6* — гибкий шланг; *7* — нижний стол.

в покрышку вставляется так называемая *варочная камера,* выталкиваемая из цилиндра *4.* Варочная камера (на рис. 11.26 не показана) представляет собой толстостенную резиновую кольцевую полость с трубкой ввода теплоносителей для последующей вулканизации покрышек.

Одновременно с перемещением варочной камеры происходит окончательное опускание верхнего стола, имеющего пневматический привод *5,* для сжатия покрышки. Затем в полость варочной камеры подается воздух, от давления которого варочная камера расправляется, растягивая покрышку. Для фиксации формы покрышки при снятии ее с форматора отверстие вентиля варочной камеры заглушается пробкой.

Значительные распорные усилия, возникающие при формовании покрышек больших размеров, делают необходимым оснащение форматоров массивными станинами *1,* по конструкции аналогичным станинам рамного или челюстного пресса.

Подача заготовок покрышек к форматорам осуществляется ленточными или крючковыми конвейерами.

10.4.4. Автоклав-прессы

Автоклав-прессы являются одним из распространенных видов вулканизационного оборудования наряду с форматорами-вулканизаторами, которыми оснащаются новые шинные заводы. Конструкция автоклав-пресса представляет собой сочетание гидравлического пресса и вулканизационного котла. Наибольшее распространение имеют автоклав-прессы со съемной крышкой и неподвижной паровой камерой (рис. 10.27).

Цилиндрическая паровая камера *7* установлена между верхней кольцевой траверсой *11* и днищем *4.* Сверху паровая камера закрывается крышкой *12,* укрепляемой на кольцевой траверсе байонетным кольцом *14.* Поворот кольца *14* для запора крышки производится механически с помощью гидроцилиндра *20* или вручную посредством реечной зубчатой передачи *19.* Резиновая манжета *21* уплотняет крышку *12.* Для ввода пара или охлаждающей воды внутрь автоклава верхняя часть паровой камеры имеет штуцеры.

С помощью колонн *5* кольцевая траверса *11* соединяется с кольцевым основанием *3,* на котором установлен гидроцилиндр *2.* В гидроцилиндре установлен плунжер *1,* уплотняющийся сальниковыми устройствами *17* и *18.* К гидроцилиндру

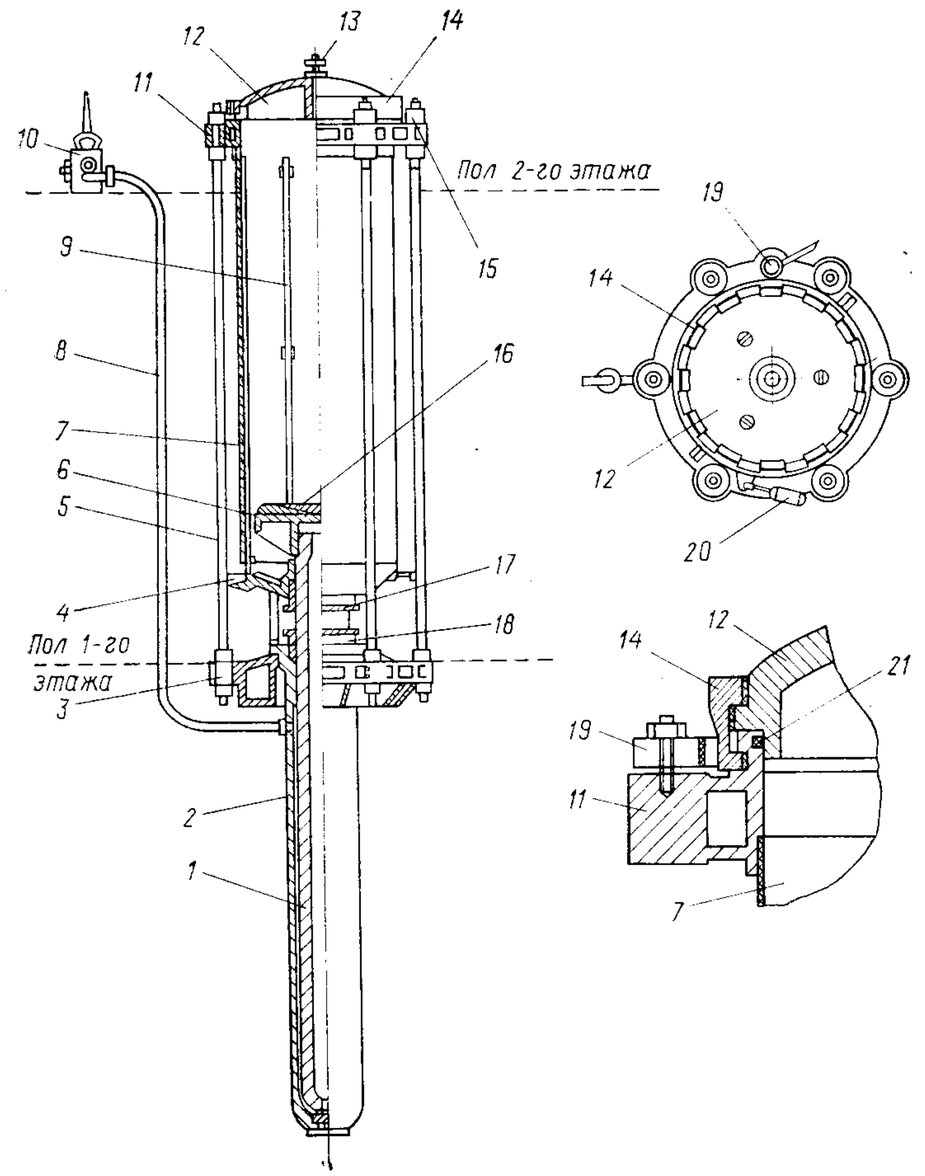


Рис. 10.27. Автоклав-пресс:

1 — плунжер; *2* — гидроцилиндр; *3* — основание; *4* — днище; *5* — колонна; *6* — стол; *7* — паровая камера; *8* — трубопровод; *9* — направляющая; *10* — гидрораспределительная коробка; *11* — траверса; *12* — крышка; *13* — клапан; *14* — байонетное кольцо; *15* — гайка; *16* — уравнительные диски; *17, 18* — сальниковые устройства; *19* — реечная зубчатая передача; *20* — гидропривод байонетного кольца; *21* — манжета.

по трубопроводу *8* через гидрораспределительную коробку *10* подается рабочая жидкость на различных стадиях технологического процесса.

Отформованные покрышки в вулканизационных формах устанавливают на столе *6*. После укладки форм по направляющим *9* и установки уравнительных дисков *16* автоклав закрывается крышкой. Далее с целью проведения процесса вулканизации в паровую камеру подается теплоноситель, а в варочную камеру, заложенную в покрышку, поступает перегретая вода под давлением 2—2,5 МПа, являющаяся прессующим и тепловым агентом.

Прессовое усилие автоклав-пресса $P_п$ следует рассчитывать, исходя из максимального размера вулканизуемых покрышек и максимального давления теплоносителя в варочной камере $p_в$, по уравнению

$$P_п = P_р + iG_ф + G_1 + T \qquad (10.52)$$

где $P_р = p_в\pi(D^2_н - D^2_{вн})/4$ — распорное усилие ($D_н$ и $D_{вн}$ — наружный и внутренний диаметры варочной камеры); i — число вулканизуемых покрышек; $G_ф$ — вес собранной покрышки с водой; G_1 — суммарный вес подвижного стола, плунжера и уравнительного диска; T — сила сопротивления в уплотнительных устройствах.

Автоклав-прессы снабжаются блокировочными устройствами, предотвращающими возможность открывания крышки при наличии в паровой камере давления.

Применение автоклав-прессов связано с большими затратами ручного труда, технологический процесс вулканизации малопроизводителен и требует введения в схему производства покрышек большого числа единиц вспомогательного оборудования.

10.4.5. Форматоры-вулканизаторы

С созданием форматоров-вулканизаторов удалось избавиться от многих трудоемких операций, связанных с применением ручного труда, и значительно интенсифицировать процессы формования и вулканизации.

Форматор-вулканизатор представляет собой пресс с механическим приводом, на плитах которого установлены полуформы для вулканизации в них покрышек. Вместо варочной камеры в этом оборудовании применяется *диафрагма* — резиновая эластичная обечайка, присоединенная по торцам к металлическим дискам и не отделяемая от машины при выгрузке покрышки. По способу функционирования этого важного узла агрегата (диафрагмы) и управления им различают форматоры-вулканизаторы типа «*бег-о-мэтик*» с неубирающейся диафрагмой и типа «*аутоформ*» с убирающейся диафрагмой.

Схема работы форматора-вулканизатора типа «бег-о-мэтик» показана на рис. 10.28. В исходном положении (рис. 10.28, *а*)

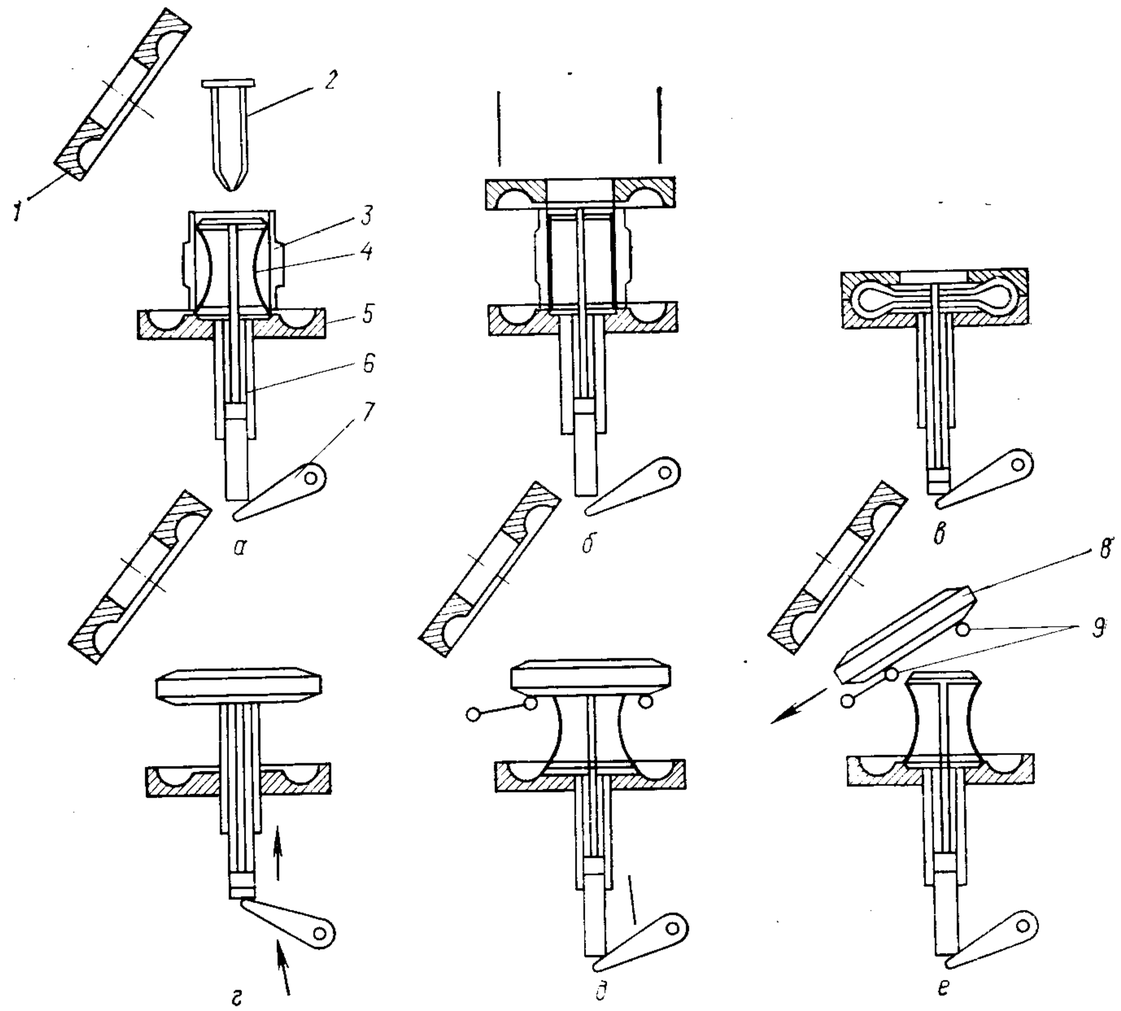


Рис. 10.28. Принцип работы форматора-вулканизатора типа «бег-о-мэтик»:
а — исходное положение; *б* — начало формования; *в* — конец формования и начало вулканизации; *г* — раскрытие паровой камеры и подъем покрышки; *д* — съем покрышки с диафрагмы; *е* — удаление покрышки; *1* — верхняя полуформа; *2* — загрузчик; *3* — заготовка; *4* — диафрагма; *5* — нижняя полуформа; *6* — цилиндр; *7* — рычаг; *8* — покрышка; *9* — рольганг.

диафрагма *4* растянута между верхним и нижним дисками. Сырая покрышка *3* сбрасывается загрузчиком *2* на диафрагму и попадает нижним торцом на полуформу *5*. При этом верхняя полуформа *1* поднята под углом к нижней полуформе. Далее полуформа *1* перемещается вниз и закрывает полуформу *5* при одновременной подаче пара под давлением 0,2—0,5 МПа в диафрагму. При сближении дисков происходит растягивание обечайки диафрагмы, которая формует покрышку (рис. 10.28, *б*). Затем следует выдержка покрышки на вулканизацию при подаче перегретой воды в диафрагму (рис. 10.28, *в*). После окончания вулканизации полуформа *1* отводится, раскрывая полость формы, а рычаг *7* поднимает покрышку (рис. 10.28, *г*). Соединяя полость диафрагмы с вакуумом, диафрагму возвращают в исходное положение (рис. 10.28, *д*), а покрышка *8* сбрасывается на приемный рольганг *9* (рис. 10.28, *е*).

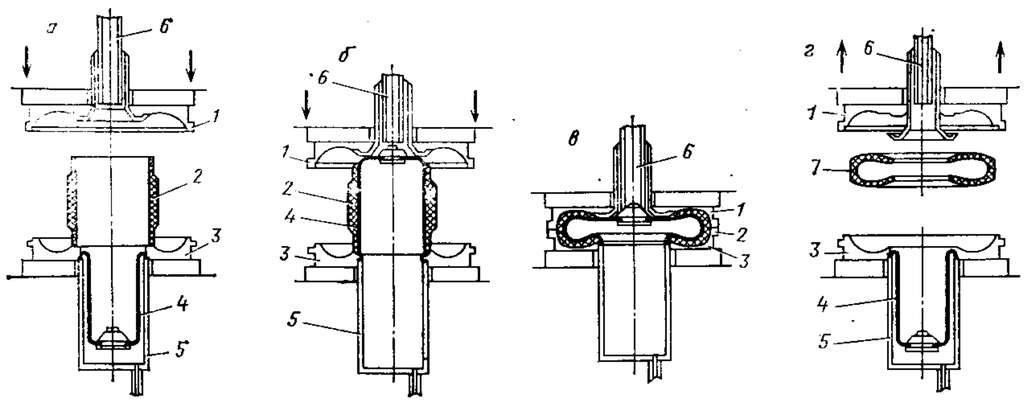


Рис. 10.29. Принцип работы форматора-вулканизатора типа «аутоформ»:
а — исходное положение полуформ и диафрагмы; *б* — ввод диафрагмы в крышку; *в* — закрытие полуформ, вулканизация; *г* — окончание вулканизации, съем покрышки; *1* — верхняя полуформа; *2* — заготовка; *3* — нижняя полуформа; *4* — диафрагма; *5* — цилиндр; *6* — шток; *7* — покрышка.

Принцип управления диафрагмой «аутоформ» (рис. 10.29) заключается в следующем. Диафрагма *4* перед началом работы убирается в цилиндр *5* (рис. 10.29, *а*). Заготовка покрышки *2* устанавливается нижним торцом на полуформу *3* при поднятой полуформе *1*. При зажиме покрышки обеими полуформами (рис. 10.29, *б*) в цилиндр *5* подается воздух, который выжимает диафрагму *4* в полость покрышки. Далее (рис. 10.29, *в*) происходит сжатие полуформ и формование покрышки. Шток *6* служит для выдавливания диафрагмы в цилиндр *5* после окончания вулканизации (рис. 10.29, *г*).

Система управления диафрагмой «аутоформ» удобнее, чем «бег-о-мэтик». Однако для ее осуществления приходится использовать диафрагмы с малой толщиной стенки (как наиболее эластичные), срок службы которых меньше, чем диафрагм, используемых в системах «бег-о-мэтик». В агрегатах «аутоформ» проще механизм привода, поскольку в них исключено движение функциональных узлов по криволинейным траекториям.

Основные параметры форматоров-вулканизаторов с неубирающейся диафрагмой стандартизованы. ГОСТ 11973—72 регламентирует в зависимости от размера вулканизуемых покрышек такие параметры, как число пресс-форм, усилие на одну пресс-форму, внутренний диаметр паровой камеры, в которую устанавливается пресс-форма, и расстояние между установочными поверхностями пресс-формы (табл. 10.5).

Условное обозначение форматора-вулканизатора с двумя камерами (пресс-формами), прессовым усилием 1000 кН (100 тс), внутренним диаметром паровой камеры 940 мм, наименьшим расстоянием между установочными поверхностями пресс-форм 185 мм и наибольшим 280 мм, с камерным обогревом может быть записано следующим образом: ФВ2—100—940—185/280 К ГОСТ 11973—72.

Таблица 10.5. Основные параметры и размеры форматоров-вулканизаторов

Тип форматоров-вулканизаторов	Число камер	Прессовое усилие на одну пресс-форму, кН (тс)	Внутренний диаметр паровой камеры, мм	Расстояние между установочными поверхностями пресс-форм	
				наименьшее	наибольшее
1—410—1800—305/635 К*	1	4100 (410)	1800	305	635
1—700—2200—325/790 К	1	7000 (700)	2200	325	790
2—70—770—140/240 К	2	700 (70)	770	140	240
2—70—880—110/200 П**	2	700 (70)	880	110	200
2—100—940—185/280 П	2	1000 (100)	940	185	280
2—200—1310—240/355 К	2	2000 (200)	1310	240	355
2—325—1510—300/420 К	2	3250 (325)	1310	300	420
2—325—1510—400/550 К	2	3250 (325)	1310	400	550

* Камерный обогрев.
** Плитовый обогрев.

На рис. 10.30 проиллюстрировано устройство форматора-вулканизатора с неубирающейся диафрагмой типа «бег-о-мэтик». Паровая камера вулканизатора состоит из двух половин: верхней полуформы *8*, укрепленной на траверсе *7*, и нижней

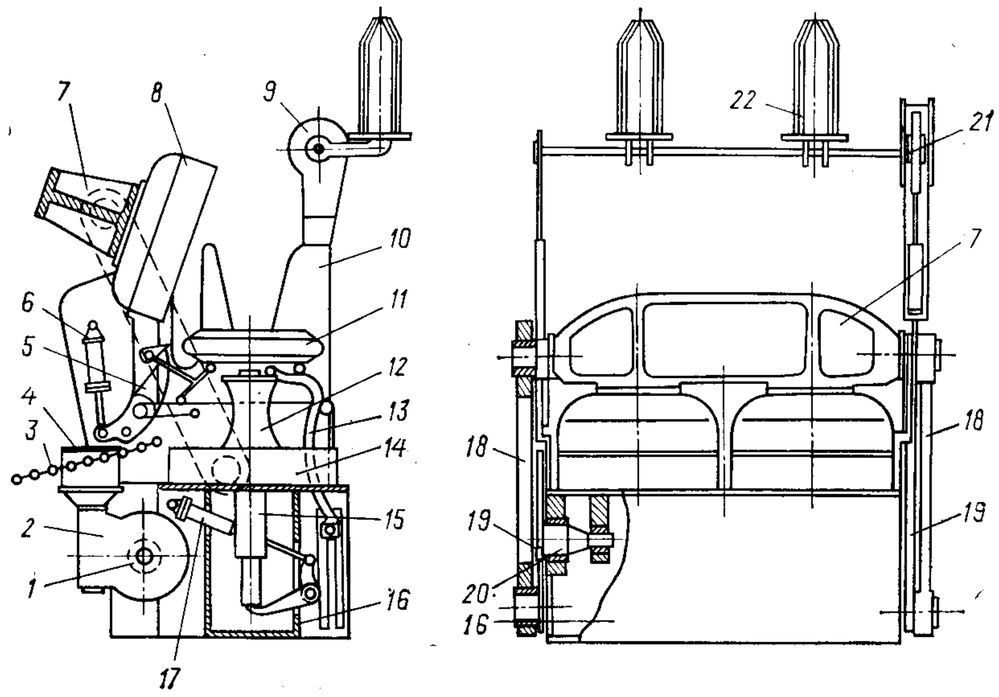


Рис. 10.30. Схема устройства форматора-вулканизатора типа «бег-о-мэтик»:
1 — зубчатая передача; *2* — червячный редуктор; *3* — рольганг; *4* — электродвигатель; *5, 13, 18* — рычаги; *6* — гидропривод траверсы; *7* — траверса; *8* — верхняя полуформа; *9* — стойка; *10* — щека; *11* — покрышка; *12* — диафрагма; *14* — нижняя полуформа; *15* — узел управления диафрагмой; *16* — станина; *17* — гидропривод управления диафрагмой; *19* — кривошип; *20* — вал; *21* — привод загрузчиков; *22* — патрон-загрузчик.

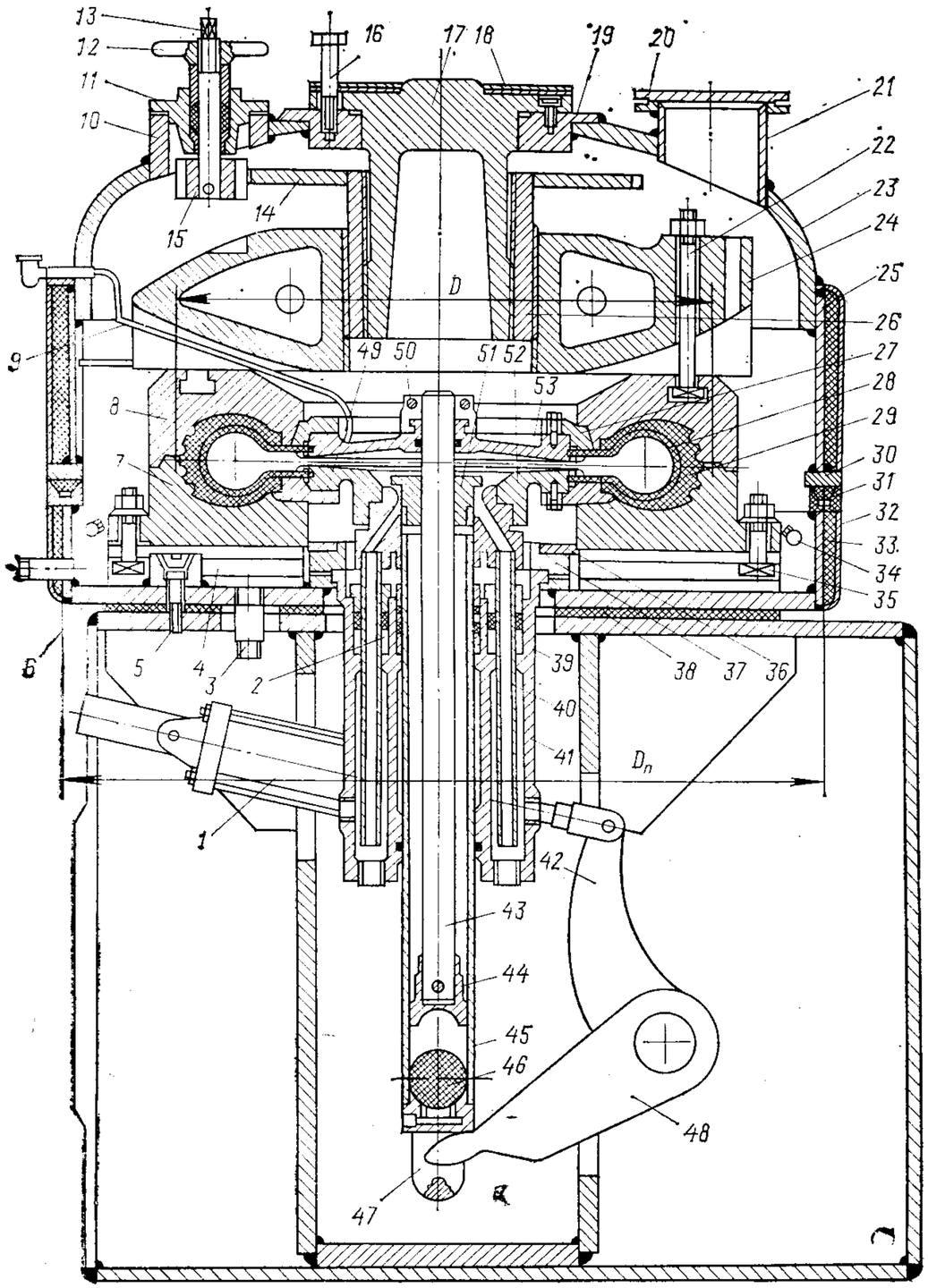


Рис. 10.31. Устройство паровой камеры и узла управления диафрагмой формато-ра-вулканизатора типа «бег-о-мэтик»:

1 — гидроцилиндр; *2* — уплотнение; *3* — патрубок; *4* — диск; *5, 16, 22, 35* — болты; *6* — днище; *7* — нижняя половина пресс-формы; *8* — верхняя половина пресс-формы; *9* — конденсатоотводная трубка; *10* — обечайка; *11* — узел уплотнения; *12* — штурвал; *13* — ось; *14* — зубчатое колесо; *15* — шестерня; *17* — втулка; *18* — прокладка; *19* — фланец; *20* — крышка люка; *21* — люк; *23* — крышка верхней половины паровой камеры; *24* — планшайба; *25* — верхняя половина паровой камеры; *26* — резьбовая втулка; *27, 49* — вкладыши; *28* — диафрагма; *29* — покрышка; *30* — кольцо; *31, 38* — прокладки резиновые; *32* — кожух; *33* — стекловата; *34* — коллектор; *36* — шайба; *37* — корпус; *39* — камера; *40* — телескопическая труба; *41* — блок цилиндров; *42, 48* — рычаги; *43* — шток; *44* — поршень; *45* — цилиндр-толкатель; *46* — клапан; *47* — вилка-опора; *50* — шпилька; *51* — уплотнительная втулка; *52, 53* — диски.

полуформы *14*, установленной на станине *16*. Механизм смыкания форм образован валом *20*, кривошипами *19*, большими рычагами *18*, соединенными с траверсой *7*. Привод смыкания состоит из электродвигателя *4*, червячного редуктора *2*, зубчатых передач *1*. Узел управления диафрагмой обозначен позицией *15*. Механизм загрузки сконструирован из патронов-загрузчиков *22*, стоек *9*, смонтированных на щеках *10*, привода *21*, а механизм выгрузки — из системы рычагов *5* и *13* с роликами, гидропривода *6* и рольганга *3*. Отрыв покрышки от пресс-формы осуществляется системой рычагов, приводимой в действие гидроприводом *17*.

Устройство паровой камеры и узла управления диафрагмой показано на рис. 10.31. Резиновая прокладка *31* разделяет верхнюю и нижнюю половины камеры. В нижней половине устанавливается полуформа *7*, укрепляемая болтами *35*, а в верхней половине — полуформа *8*, скрепленная болтами *22* с планшайбой *24*. Планшайба через резьбовую втулку *26* с зубчатым колесом *14* соединена с втулкой *17* и далее через болты *16*, прокладку *18* и фланец *19* — с верхней подвижной траверсой форматора-вулканизатора. Вращение шестерни *15* от ручного привода, состоящего из обечайки *10*, штурвала *12*, оси *13* и узла уплотнения *11*, приводит к перемещению по высоте планшайбы *24* с целью регулирования плотности смыкания полуформ *8* и *7*. На крышке *23* верхней половины паровой камеры *25* укреплены люк *21* с крышкой *20*, служащий для крепления формы, конденсатоотводная трубка *9* и кольцо *30*. Паровая камера имеет теплозащитный слой *33* из материала типа стекловаты, заключенный в кожух *32*. Нижняя половина пресс-формы *7* с помощью диска *4* и болта *5* крепится к днищу *6*.

Управление диафрагмой *28*, закрепленной между дисками *52* и *53*, производится с помощью блока цилиндров *41*. Шток *43* соединен с верхним диском *53* и приводится в возвратно-поступательное движение поршнем *44*, движущимся в цилиндре-толкателе *45* с клапаном *46*. Нижняя часть диафрагмы вместе с нижним диском *52* и кольцом *49* также может двигаться с помощью рычага *48*, приводимого в действие гидроцилиндром *1* через рычаг *42*. Этим движением вверх производится отрыв покрышки от нижней полуформы. Теплоноситель в диафрагму поступает через телескопические трубы *40*, имеющие уплотнение *2*. Паровая камера отделена от станины прокладкой *38* и снабжена патрубками слива воды *3* и коллектором подачи воды *34*. Управление подачей теплоносителей и процессом формования полностью автоматизировано.

В последние годы разработаны бездиафрагменные форматоры-вулканизаторы, в которых формующий пар подается непосредственно во внутреннюю полость покрышки. В этих вулканизаторах особое внимание уделяется конструированию надежного зажима борта покрышки, обеспечивающего герметичность внутренней полости.

10.4.6. Конструкция пресс-форм

Формование покрышки и ее вулканизация осуществляются в пресс-форме — формующем инструменте форматора-вулканизатора. Пресс-форма, состоящая из двух половин, испытывает значительные нагрузки от внутреннего давления. Поэтому она выполняется в виде массивного изделия из высококачественной стали. Поверхность оформляющей полости для придания ей высокой твердости подвергается термообработке.

К точности изготовления полуформ также предъявляются повышенные требования. Поверхность контакта двух полуформ выполняется таким образом, чтобы плотность прилегания их друг к другу исключала бы выпрессовки резины из полости формы. Для выхода паров и газообразных продуктов реакции вулканизации в теле пресс-формы имеются сквозные отверстия, число и размер которых зависят от типа рисунка протектора и размера покрышки.

В современных конструкциях форматоров-вулканизаторов распространены *секторные пресс-формы*, которые облегчают загрузку сырых покрышек и выгрузку готовых. Кольцо оформления рисунка такой пресс-формы состоит из нескольких секторов, которые могут раздвигаться или сдвигаться при проведении той или иной операции технологического цикла.

Оформляющая полость секторной пресс-формы (рис. 10.32) образована полуформами *11* и *4* и секторами *6*. Полуформа *11* закреплена на плите *12*, а полуформа *4* устанавливается на подвижной траверсе *2*. Секторы *6* вместе с вкладышами *7* могут передвигаться по направляющим *8*, расположенным наклонно. При движении вкладышей *7* вниз секторы *6* смыкаются, образуя вместе со сжатыми полуформами *11* и *4* оформляющую полость для покрышки. В цилиндре *13* находится диафрагма *14*, закрепленная на кольце *15* полуформы *11*. Паровая камера образована верхней *3* и нижней *9* половинами. Кольцо *10* служит конструктивным элементом, воспринимающим усилие, действующее на секторы со стороны покрышки. Толкатель *1* перемещает диафрагму в полость цилиндра *13*.

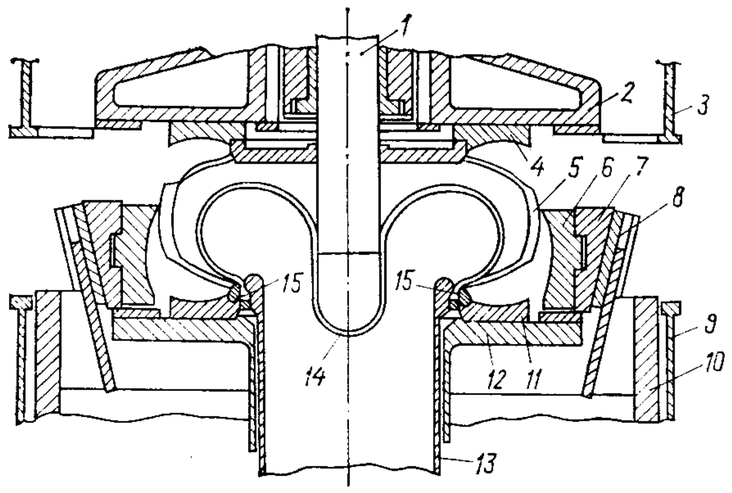


Рис. 10.32. Секторная пресс-форма:
1 — толкатель; *2* — траверса; *3* — верхняя половина паровой камеры; *4* — верхняя полуформа; *5* — покрышка; *6* — секторы; *7* — вкладыши; *8* — направляющие; *9* — нижняя половина паровой камеры; *10* — кольцо; *11* — нижняя полуформа; *12* — плита; *13* — цилиндр; *14* — диафрагма; *15* — кольцо полуформы.

В пресс-форме секторной конструкции значительно упрощена выгрузка готовой покрышки. При движении вкладышей вверх по направляющим секторы *6* выходят из зацепления с протектором покрышки и освобождают ее для последующего удаления из нижней половины пресс-формы.

10.4.7. Силовой и прочностной расчет форматоров-вулканизаторов

Основой силового расчета форматора-вулканизатора является определение распорного усилия на пресс-форму $P_р$. Это усилие складывается из усилия $Q_р$, возникающего от внутреннего давления в диафрагме $p_в$, усилия $Q_н$, сжимающего пресс-форму снаружи, от воздействия наружного давления в паровой камере $p_н$ и усилия $Q_п$, раскрывающего паровую камеру и возникающего от давления $p_н$. Таким образом, распорное усилие $P_р$ может быть определено как

$$P_р = Q_р - Q_н + Q_п = (\pi D^2/4)\, p_в - (\pi D^2/4)\, p_н + (\pi D_п^2/4)\, p_н \qquad (10.53)$$

где D — средний диаметр уплотнительной поверхности пресс-формы; $D_п$ — средний диаметр уплотнительной прокладки паровой камеры (обозначения см. на рис. 10.31).

Давление теплоносителя в диафрагме выбирается $p_в = 2 \div 2{,}5$ МПа, давление в паровой камере $p_н = 0{,}6 \div 0{,}8$ МПа. Значения усилия $P_р$ после расчета по формуле (10.52) корректируются по данным табл. 10.5.

Номинальное усилие затяжки (смыкания) пресс-формы форматора-вулканизатора $Q_з$ выбирается равным

$$Q_з = P_р k_з \qquad (10.54)$$

где $k_з$ — коэффициент, учитывающий необходимость создания натяга на уплотнительной поверхности пресс-формы ($k_з = 1{,}25 \div 1{,}5$).

Методика расчета на прочность паровых камер до настоящего времени недостаточно разработана, поэтому при расчете ее элементов пользуются методиками прочностного расчета сосудов, работающих под внутренним давлением. Так, толщина стенки паровой камеры $s_к$ может быть определена по формуле расчета эллиптических днищ:

$$s_к = pR_д/(2\varphi_д [\sigma] - 0{,}5p) + c \qquad (10.55)$$

здесь p — расчетное внутреннее избыточное давление; $R_д$ — радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности; $\varphi_д$ — коэффициент прочности сварных швов; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение при расчетной температуре ($[\sigma] = \sigma_т/n_т$, где $\sigma_т$ — предел текучести; $n_т$ — коэффициент запаса прочности, $n_т = 1{,}5$); c — сумма прибавок к толщинам стенок для компенсации коррозии.

Траверсы форматоров-вулканизаторов подвергаются действию распорного усилия; кроме того, во время работы они испытывают воздействие температурных напряжений в результате неравномерного нагрева по высоте. Траверсы выполняют из стали сварными из листов или литыми. Напряжение изгиба от действия распорного усилия $P_р$ определяют при рассмотрении траверсы как балки, свободно лежащей на двух опорах. Расчетная схема представлена на рис. 10.33. Действие распорного усилия $P_р$ заменено в данной схеме влиянием двух нагрузок $P_р/2$, расположенных на расстоянии l_2, так как эта траверса конструктивно связана с двумя пресс-формами. Напряжение изгиба в опасном сечении определяется по уравнению

$$\sigma_и = M_{макс}/W = P_р l_1/2W \qquad (10.56)$$

где

$$W = [BH^3 - (B - b)(H - 2b_1)^3]/(6H)$$

Поскольку конструкция траверсы должна обладать значительной жесткостью, при проведении прочностных расчетов необходимо оценить наибольшую стрелу прогиба в середине пролета:

$$f_{макс} = [P_р l_1/(2EI)](3l_2^2 + 8l_1^2 + 12l_2 l_1)/24 < [f] \qquad (10.57)$$

где $[f] = 1 \div 2$ мм.

Подъем, опрокидывание и опускание траверсы паровой камеры в форматоре-вулканизаторе осуществляют приводные устройства разнообразных конструкций. Наиболее распространен привод с кривошипно-шатунным механизмом, звенья которого в ходе технологического цикла испытывают нагрузки от сопротивления покрышки, усилий затяжки, отрыва верхних полуформ от покрышки, веса паровой камеры. Механизм привода воспринимает распорное усилие при выключенном электродвигателе, а в процессе формования обеспечивает переменную скорость опускания верхних полуформ во избежание удара при соударении с нижними полуформами. Привод, схема которого изображена на рис. 10.34, состоит из червячного редуктора (червяка *5* и колеса *4*) с встроенным электродвигателем *7*, шестерен *3*, зубчатых колес *2* с кривошипами и шатунов *1*, соединенных траверсой *6*.

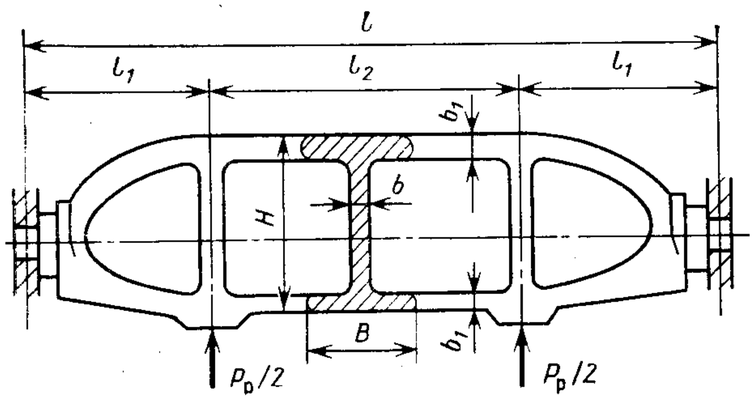
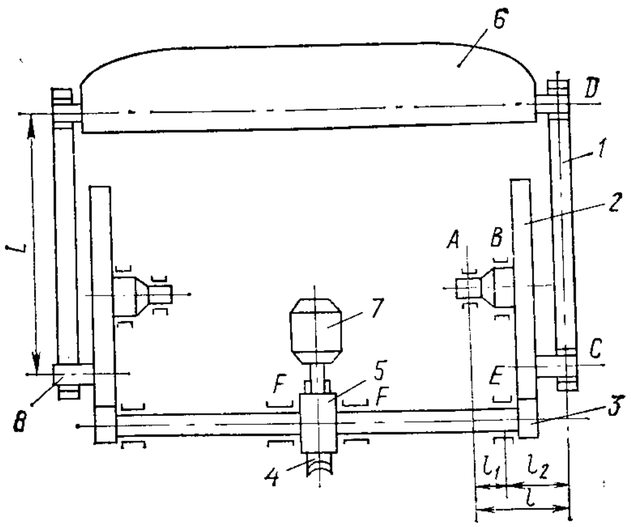


Рис. 10.33. Расчетная схема траверсы.

Рис. 10.34. Схема привода форматора-вулканизатора:
1 — шатун; *2* — зубчатое колесо; *3* — шестерня; *4* — червячное колесо; *5* — червяк; *6* — траверса; *7* — электродвигатель; *8* — кривошип.



Силовой расчет приводов форматоров-вулканизаторов представляет значительные трудности ввиду отсутствия строго научного обоснования кинематики и динамики движения звеньев механизма. Поэтому для решения практических задач выбор схемы нагружения звеньев механизма основывается на ряде предположений. Так, например, принимается, что наибольшие усилия в звеньях возникают во время затяжки при компенсации распорного усилия. Может быть принято во внимание предположение о том, что наибольшее усилие возникает при открывании затянутых пресс-форм или при трогании с места отведенной в крайнее положение и опрокинутой траверсы. Чтобы выбрать расчетную нагрузку, приходится выполнять расчет действующих сил с учетом всех сделанных предположений. В качестве примера определим мощность на валу электродвигателя привода форматора-вулканизатора, схема которого изображена на рис. 10.34, исходя из предположения максимальности нагрузок в момент смыкания пресс-форм. Методика проведения расчета по другим схемам нагружения элементов конструкции привода описана в специальной литературе*.

Для определения мощности на валу электродвигателя привода $W_д$ (кВт) может быть использована формула

$$W_д = \frac{2[(M_{кр} + M_{тр1})/i_1 + M_{тр2} + M_{тр3}]N_д}{97{,}4 i_ч \eta_ч} \qquad (10.58)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент на кривошипе колеса 2, Н·м; $M_{тр\,1}$ — момент трения в подшипниках колеса *2* и шатунах *1*, Н·м; $M_{тр\,2}$ — момент трения в подшипнике шестерни *3*, Н·м; $M_{тр\,3}$ — момент трения в подшипнике червячного колеса *4*, Н·м; i_1 — передаточное число зубчатого зацепления колеса *2* — шестерня *3*; $i_ч$ — передаточное отношение червячной пары; $N_д$ — частота вращения электродвигателя, об/мин; $\eta_ч$ — к. п. д. червячного редуктора (пары).

* *Цыганок И. П.* Вулканизационное оборудование шинных заводов. М.: Машиностроение, 1967, с. 105—123.

Крутящий момент $M_{кр}$ создается усилием затяжки пресс-формы $Q_з^*$, действующим на плечо $x = L \operatorname{tg} \alpha$ (где L — расстояние между осями траверсы *6* и центром кривошипа зубчатого колеса *2* в момент запирания, α — угол между рабочим положением шатуна в момент запирания и его «мертвой точкой»). Оптимальное значение $\alpha = 3 \div 6°$ ограничивается условиями нагрузки элементов конструкции и выбирается при экспериментальном изучении зависимости величины $P_р$ от угла α.

Отсюда

$$M_{кр} = Q_з^* x \qquad (10.59)$$

Величина $Q_з^*$ определяется по уравнению

$$Q_з^* = Q_з - (G_{тр}/2 + G_ш + G_к + G_ф + G_{зк}) \qquad (10.60)$$

где $Q_з$ — номинальное усилие затяжки; $G_{тр}$, $G_ш$, $G_к$, $G_ф$, $G_{зк}$ — вес траверсы, шатуна, паровой камеры, верхней полуформы, зубчатого колеса соответственно.

Момент трения $M_{тр1}$ в подшипниках колеса *2* и шатуна *1* складывается из моментов, действующих в подшипниках *A*, *B*, *C*, *D*:

$$M_{тр1} = (R_A d_з + R_B d_2 + R_C d_1 + R_D d_0) f/2 \qquad (10.61)$$

где R_A, R_B, R_C, R_D — реакции опор *A*, *B*, *C*, *D*; $d_з$, d_2, d_1, d_0 — диаметры цапф опор *A*, *B*, *C*, *D*; f — коэффициент трения скольжения ($f \approx 0{,}05$).

Реакции опор равны

$$R_C = R_D = Q_з^*; \qquad R_B = R_C l/l_1; \qquad R_A = R_B - R_C \qquad (10.62)$$

Геометрические параметры l и l_1 указаны на рис. 10.34.

Момент трения $M_{тр2}$, действующий в подшипнике опоры *E* шестерни *3*, создается распорным усилием $P_{рк\,2}$ зубчатого зацепления колесо *2* — шестерня *3*, которое определяется как

$$P_{рк2} = P_{ок} \operatorname{tg} \beta \qquad (10.63)$$

где $P_{ок} = 2(M_{кр} + M_{тр\,1})/d_{к2}$ — окружное усилие, противодействующее моментам $M_{кр}$ и $M_{тр\,1}$; $d_{к2}$ — диаметр начальной окружности зубчатого зацепления; β — угол зацепления зубчатой пары.

Далее имеем:

$$M_{тр2} = P_{рк2} d_E f/2 \qquad (10.64)$$

где d_E — диаметр цапфы опоры *E*.

Момент трения $M_{тр\,3}$, действующий в подшипнике опоры *F*, определяется следующим образом:

$$M_{тр3} = P_{чк} \operatorname{tg} \beta_ч d_F f/4 \qquad (10.65)$$

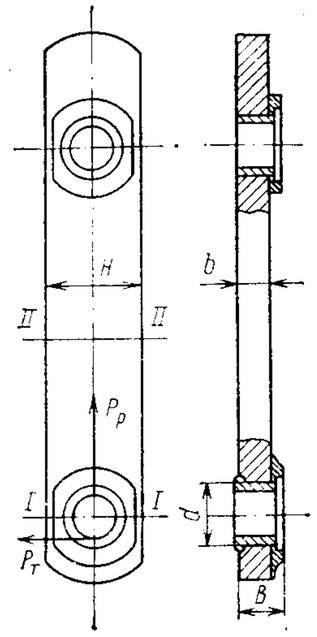
где $P_{чк}$ — окружное усилие на червячном колесе; $\beta_ч$ — угол зацепления червячного колеса; d_F — диаметр цапфы опоры *F*.

Величина $P_{чк}$ равна

$$P_{чк} = 4(P_{ок} d_{ш3}/2 + M_{тр2})/d_{чк}$$

где $d_{ш3}$ и $d_{чк}$ — диаметры начальных окружностей шестерни *3* и червячного колеса *4* соответственно.

Рис. 10.35. Схема шатуна.



Коэффициент полезного действия червяка $\eta_ч$ определяется по уравнению

$$\eta_ч = \operatorname{tg} \lambda/(\operatorname{tg} \lambda + f) \qquad (10.66)$$

где λ — угол подъема винтовой линии червяка.

Снижение потребляемой мощности может быть достигнуто путем приближения положения шатуна к «мертвой точке» и уменьшения коэффициента трения в подшипниках.

Расчет на прочность элементов зубчатых зацеплений (колес *2* и шестерни *3*) передач приводов форматоров-вулканизаторов проводится по стандартным методикам по наибольшему крутящему моменту $M^*_{кр} = M_{кр} + M_{тр\,1}$. Для расчета на прочность червяка *5* и колеса *6* червячного зацепления следует использовать крутящий момент

$$M_{чк} = M_{кр} + M_{тр1} + M_{тр2}$$

Расчет на прочность шатуна (рис. 10.35) сопровождается определением минимальной деформации удлинения его под действием нагрузок, так как большие удлинения шатунов отрицательно сказываются на работе передач и увеличивают время воздействия на конструкцию пиковых нагрузок.

Усилие $P_р$, растягивающее шатун, и сила трения $P_т = fP_р$ вызывают в сечении *I—I* действие наибольших напряжений, равных

$$\sigma_I = (P_р + P_т)\, \alpha_к/F < [\sigma] \qquad (10.67)$$

где F — площадь сечения *I—I* шатуна; $\alpha_к$ — коэффициент концентрации напряжений, зависящий от соотношения параметров d/H и B/H (см. рис. 10.35); $\alpha_к = 2 \div 6$; $[\sigma] = 0{,}6\sigma_т$ (здесь $\sigma_т$ — предел текучести материала шатуна — сталей марки Ст. 3, Ст. 4).

Напряжения в сечении *II—II* определяются по уравнению

$$\sigma_{II} = P_р/(Hb) < [\sigma] \qquad (10.68)$$

где H и b — геометрические параметры сечения *II—II*.

10.4.8. Линии вулканизации покрышек

Дальнейшее повышение производительности труда, получение высококачественных покрышек и улучшение технико-экономических показателей возможно при внедрении в производство механизированных и автоматизированных линий вулканизации покрышек. При использовании многопозиционных вулканизато-

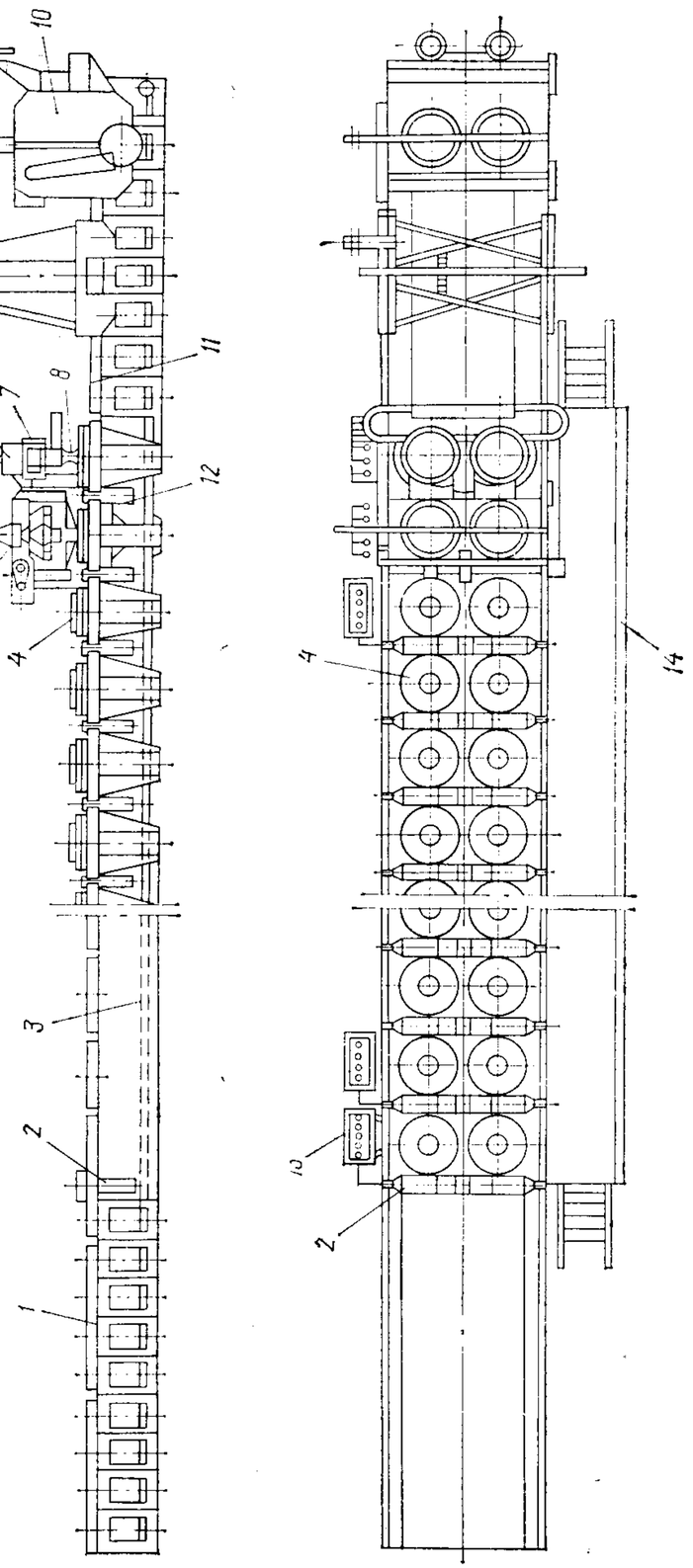


Рис. 10.36. Схема расположения оборудования линии для вулканизации покрышек (многопозиционного вулканизатора):
1 — станина; *2*, *12* — лотки; *3* — транспортер; *4* — вулканизационные элементы; *5* — перезарядчик; *6* — патрон; *7* — покрышка; *8* — диафрагма; *9* — кассета; *10* — резервный перезарядчик; *11* — настил; *13* — стойка; *14* — ограждение.

ров все технологические операции, производимые до и после вулканизации, выполняются передвижным перезарядчиком.

Поскольку продолжительность всех операций, связанных с перезарядкой, гораздо меньше продолжительности вулканизации, то перезарядчик может за один цикл обслужить несколько десятков вулканизационных аппаратов.

На рис. 10.36 изображена схема расположения основных узлов многопозиционного вулканизатора. Вулканизационные элементы *4*, объединенные в секции по два, располагаются на станине *1*. Каждая секция оборудована лотками *2* и *12*, служащими для направления готовых покрышек на ленточный транспортер *3*, проходящий под настилом *11*. На стойках *13* смонтирована аппаратура управления работой каждой секции вулканизации.

Перезарядчик *5* представляет собой металлическую раму, которая установлена на колесах, передвигающихся по рельсовому пути. Покрышка *7* захватывается патроном *6* и с помощью поворотной штанги переносится в нижнюю половину пресс-формы, имеющую диафрагму *8*. После окончания процесса вулканизации перезарядчик поднимает крышку вулканизатора, освобождая доступ к нижней половине пресс-формы, а механизм фиксации закрепляет перезарядчик в положении перезарядки. Число секций на один перезарядчик подбирается таким образом, чтобы за время, необходимое для вулканизации одной покрышки, перезарядчик успел перезарядить все секции. Во избежание простоя линии в случае выхода из строя перезарядчика *5* агрегат комплектуется резервным перезарядчиком *10*. Многопозиционные вулканизаторы оснащаются набором блокирующих устройств, исключающих возможность раскрытия вулканизационного элемента при наличии в нем давления, а также выполнения последующей операции до окончания предыдущей. Конструкция вулканизационного элемента практически не отличается от представленного выше на рис. 10.31.

Применение многопозиционных вулканизаторов покрышек вместо форматоров-вулканизаторов дает возможность повысить производительность труда в 1,5 раза, сократить металлоемкость и производственные площади в 1,5—2,5 раза.

10.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ НЕФОРМОВЫХ РЕЗИНОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Значительную часть ассортимента резиновых технических изделий составляют неформовые детали, получаемые без использования формы. Это экструдированные профильные изделия: трубы, шланги, ленты и т. д., а также рукава, получаемые методами навивки, оплетки, обмотки. Формовые штучные изделия, получаемые методами прессования и литья под давлением, вулканизуют, как было описано выше, непосредственно в формующем инструменте — пресс-форме или литьевой форме. Заго-

товки сложных штучных изделий после сборки могут вулканизироваться в котлах, автоклавах, подобных описанным в разд. 10.4.4.

Основной тенденцией механизации и автоматизации непрерывных процессов производства неформовых РТИ является внедрение способов вулканизации без избыточного давления в расплавах солей и в псевдоожиженном слое. Линия непрерывной вулканизации в расплаве солей включает в себя следующие основные узлы: питатель, ванну вулканизационную, ванну промывочную, протаскивающее устройство и отборочный транспортер. Питатель предназначен для непрерывного питания установки заготовками необходимого профиля. Заготовка транспортируется ленточным транспортером через обогреваемую ванну, заполненную смесью солей СС-4, состоящей из 53% KNO_3, 40% $NaNO_3$ и 7% $NaNO_2$. Солевой теплоноситель СС-4 отличается высокой плотностью, пожаро- и взрывобезопасностью. При транспортировании заготовки на определенной глубине со скоростью до 0,25 м/с при температуре расплава 453—513 К происходит вулканизация заготовки. Для охлаждения и промывки вулканизованного профиля его перемещают с помощью протягивающего устройства (рифленого барабана) через промывочную ванну с проточной водой.

Сравнительно недавно стала применяться вулканизация неформовых РТИ в псевдоожиженном слое гранулированного твердого материала: измельченного песка или стеклянных шариков. Этот способ считается перспективным для изготовления тонкостенных и губчатых профилей. При вулканизации в псевдоожиженном слое заготовка профиля протягивается через ванну горизонтального или вертикального типа, в которой потоком горячего воздуха создается «кипящий» слой зернистого материала. При этом происходит нагрев заготовки от теплоносителя — псевдоожиженного слоя и ее вулканизация. Недостаток линий вулканизации в псевдоожиженном слое состоит в том, что их производительность в 2 раза ниже производительности линий с использованием расплавов солей.

ГЛАВА 11

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

11.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ФОРМОВАНИЯ

Стеклопластики представляют собой композиционные материалы, состоящие из наполнителя (стекловолокон различной длины, с разным характером и степенью упорядоченности взаимного расположения) и связующего (чаще всего термореактивных смол).

Стеклонаполнитель образует прочный каркас в отформованном изделии, сопротивляющийся деформациям и разрушению под действием эксплуатационных нагрузок. Связующее обеспечивает монолитность материала изделия и равномерность нагружения элементарных волокон наполнителя при действии на изделие нагрузок.

Методы формования изделий из стеклопластиков и оборудование для этой цели чрезвычайно многообразны. Это многообразие обусловлено тем, что различными могут быть: 1) способ ввода связующего в наполнитель (первый признак) и 2) давление, прикладываемое к материалу на стадии ввода связующего и формования изделия (второй признак).

В соответствии с первым признаком различают: ввод связующего в наполнитель до формования изделия и совмещение этих компонентов в процессе формования изделия. Во втором случае оборудование предназначено для выполнения следующих технологических операций: подготовка связующего, подготовка наполнителя, совмещение этих компонентов, формование изделия, отверждение материала изделия. В первом же случае на формующем оборудовании выполняются только две последние операции.

В соответствии со вторым признаком выделяют методы формования без давления, при малых давлениях (0,5—2,5 МПа), при средних давлениях (4—7 МПа), при высоких давлениях (20—40 МПа).

В первом случае оборудование включает в себя только устройства для подготовки компонентов и нанесения их на поверхность формующего инструмента. При последних двух методах формования в состав оборудования входят также и прессы для смыкания форм со значительным формующим усилием. Во втором случае формующее давление на материал может создаваться как прессом, так и сжатым воздухом, вводимым непосредственно в формующий инструмент.

11.2. ТИПЫ СТЕКЛОНАПОЛНИТЕЛЕЙ

Наибольшее применение в качестве наполнителей в изделиях из стеклопластиков нашли жгуты, холсты и ткани.

Стекложгут — наиболее дешевый наполнитель; он представляет собой пучок, содержащий 60—120 нитей, каждая из которых состоит из 200 элементарных волокон диаметром 6—8 мкм. Параллельное расположение волокон в жгуте позволяет в наиболее полной мере использовать их прочностные свойства. Жгуты в основном используются при формовании высокопрочных изделий методом намотки. Используются также рубленые жгуты в виде отрезков длиной от 10 до 100 мм.

Стеклохолсты — рулонные нетканые материалы с произвольным взаимным расположением волокон, соединение которых между собой достигается либо за счет небольших количеств клеящих веществ, либо за счет механического сшивания с тонкой подложкой, например с марлей.

Наиболее ответственные конструкции обычно изготавливают со *стеклотканями* в качестве наполнителей. Стеклоткани различаются характером плетения, числом нитей по основе и по утку, толщиной нити и др. Достоинство тканей по сравнению с холстами заключается в том, что на их основе можно получать более прочный материал с бóльшим содержанием наполнителя, имеющий стабильные физико-механические показатели.

11.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ФОРМОВАНИЯ

11.3.1. Контактное формование

Метод контактного формования применяется для изготовления строительных конструкций, корпусов лодок и судов длиной до 50 м, кузовов автомобилей, а также для футеровки химических аппаратов и емкостей.

Этот метод (рис. 11.1) осуществляется на негативных или позитивных поверхностях формующего инструмента с ручной выкладкой наполнителя на форме *1* и одновременной пропиткой его связующим вручную кистями или распылительным пистолетом. Далее формуемое изделие прикатывают рифленым валиком *3* для удаления пузырьков воздуха и уплотнения материала. После уплотнения изделие можно покрыть пленкой и дополнительно прижать гладким валиком — для разглаживания неровностей и удаления избытка связующего. Формующую по-

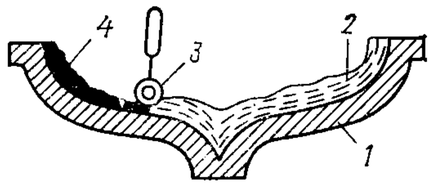


Рис. 11.1. Схема контактного формования:
1 — форма; *2* — слой рыхлого наполнителя со связующим; *3* — прикаточный валик; *4* — уплотненный слой материала.

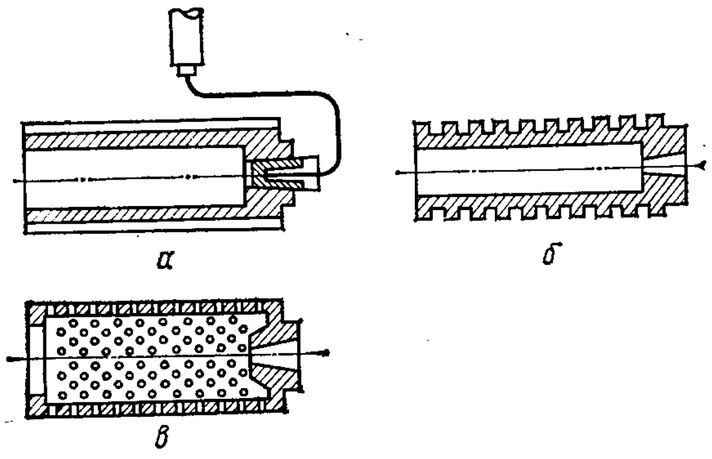


Рис. 11.2. Рифленые прикаточные валики:
а — с продольными канавками; *б* — с кольцевыми канавками; *в* — с перфорированной поверхностью.

верхность перед выкладкой наполнителя обычно покрывают разделительным слоем. Отверждение изделия может быть интенсифицировано нагревом с помощью инфракрасных нагревателей или горячим воздухом.

Оборудование для контактного формования включает в себя аппарат для подготовки связующего и прикатывающие валики. Основные конструкции рифленых валиков представлены на рис. 11.2. Наиболее просты в изготовлении и удобны в работе валики с кольцевыми проточками шириной 3—10 мм с шагом 6—12 мм. Усилие, действующее на валик, составляет обычно 50—160 Н. Крепление валиков к рукоятке — консольное (для удобства смены валиков при прикатке сложных поверхностей).

Более совершенны по конструкции валики с подачей в них связующего (рис. 11.3). Вращающийся в подшипнике *2* валик *1* выполнен полым с отверстиями для истечения из него связующего, которое подается через трубу *3*. Последняя является одновременно и скобой, к которой крепится рукоятка *7*. Расход связующего регулируют краном *4*. Подача компонентов связующего (например, полиэфирной смолы с отвердителем и инициатором) осуществляется по шлангам *6* через смесительную камеру *5*. Конструкция смесительной камеры практически исключает образование застойных зон, следовательно, сведена к минимуму опасность отверждения связующего.

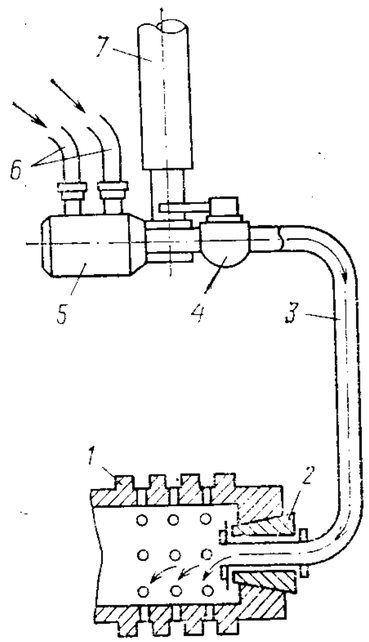


Рис. 11.3. Валик с устройством для подачи связующего:
1 — валик; *2* — подшипник; *3* — труба; *4* — кран; *5* — смесительная камера; *6* — шланги; *7* — рукоятка.

11.3.2. Напыление

Напыление отличается от контактного формования лишь типом наполнителя и способом нанесения связующего и наполнителя на форму (рис. 11.4). Стекложгут *5* проходит режущее устройство *3* и напыляется на поверхность формы *1*. В ту же зону формы с помощью форсунки *4* напыляется связующее. После нанесения слоя требуемой толщины композицию уплотняют рифлеными валиками и дополнительно после укладки пленочного покрытия прикатывают гладкими валиками.

Установки для напыления состоят из двух основных узлов: пистолета, с помощью которого оператор напыляет рубленое волокно и связующее на поверхность формы, и передвижного корпуса, в котором монтируются устройства для подачи наполнителя и связующего к пистолету.

Для напыления и контактного формования обычно используются полиэфирные связующие, отверждение которых при комнатной температуре происходит в присутствии инициатора и ускорителя. Пример конструкции установки показан на рис. 11.5. В этой установке на тележке *1* размещается бочка *2*, содержащая полиэфирную смолу, смешанную с ускорителем (рис. 11.5, *а*). Инициатор заливается в бачок *6*. Смола подается из бочки по шлангу *18* в смесительную камеру *11* пистолета рис. 11.5, б) дозировочным насосом *3*, который установлен на стойке *4* и может перемещаться по ней вверх и вниз. Инициатор из бачка *6* подается в смесительную камеру вторым дозировочным насосом *7* по шлангу *16*.

К смесительной камере *11* также подведен шланг *17* от бачка *8* с растворителем, который давлением сжатого воздуха может в случае необходимости подаваться в смесительную камеру и форсунку для быстрой их очистки.

Смола с ускорителем смешиваются в камере *11* пистолета и через форсунку напыляются на форму. Стекложгуты *15* тянуще-рубящим устройством *13* сматываются с бобин *5*. Рубленое волокно сжатым воздухом, подаваемым в пистолет по шлангу *14*, напыляется на форму через сопло *12*.

Сжатый воздух поступает в распределитель *9* из цеховой магистрали.

Пистолет состоит из нескольких механизмов и поэтому достаточно тяжел. Для удобства обращения с ним он подвеши-

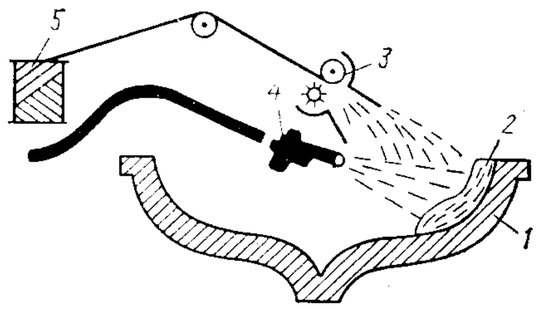


Рис. 11.4. Схема метода напыления:
1 — форма; *2* — слой напыленного материала; *3* — режущее устройство; *4* — форсунка для напыления связующего; *5* — бобина со стекложгутом.

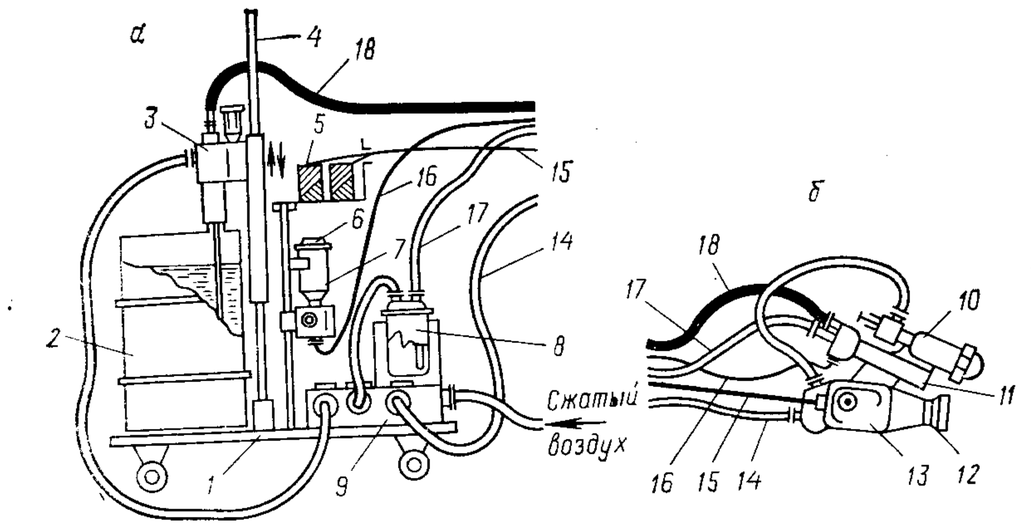


Рис. 11.5. Установка для формования напылением (*а*) и пистолет распылитель, применяемый в этой установке (*б*):
1 — тележка; *2* — бочка со связующим; *3* — дозировочный насос; *4* — стойка; *5* — бобины стекложгута; *6* — бачок с инициатором; *7* — дозировочный насос; *8* — бачок с растворителем; *9* — воздухораспределитель; *10* — форсунка для связующего; *11* — смесительная камера; *12* — диффузор для напыления стекловолокна; *13* — тянуще-рубящее устройство; *14, 16, 17, 18* — шланги для подачи воздуха, инициатора растворителя, связующего соответственно; *15* — стекложгут.

вается на поворотной консоли с противовесом, которая укреплена на самостоятельной тележке.

Метод напыления более производителен, чем метод контактного формования, однако и он не лишен недостатков. В частности, довольно значительны (до 5%) потери стекловолокна; стекловолокнистая пыль, находясь во взвешенном состоянии, вместе с парами связующего загрязняет воздух рабочего помещения. Самым существенным недостатком, как и в методе контактного формования, является повышенная пористость получаемого изделия. Прикатывающими валиками практически невозможно уплотнить формуемое изделие по всей площади и выдавить воздушные включения из всего объема. Кроме того, после снятия контактного давления валика на материал стекловолокно, обладающее упругостью, вновь частично разрыхляется, и воздушные включения опять перемещаются в это разрыхленное место. Поверхность изделия, не контактировавшая с формой, получается грубоволокнистой, неровной, с торчащими из нее волокнами и поэтому требует последующей обработки.

Бо́льшей части этих недостатков лишена другая разновидность метода, описанная в следующем разделе.

11.3.3. Формование с помощью эластичной диафрагмы

Все технологические операции по нанесению связующего с наполнителем на форму аналогичны описанным выше.

На рис. 11.6 показана схема формования изделий из стеклопластиков при помощи эластичной диафрагмы под давлением (рис. 11.6, *а*) и под вакуумом (рис. 11.6, *б*).

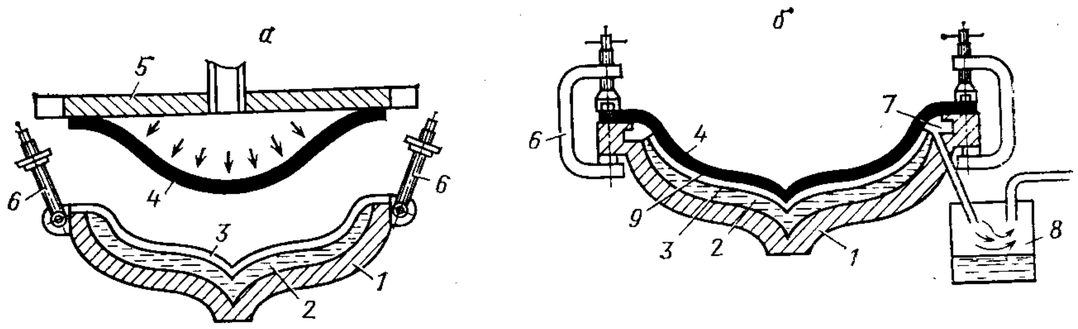


Рис. 11.6. Формование с помощью эластичной диафрагмы под давлением (*а*) и вакуумом (*б*):
1 — форма; *2* — формуемое изделие; *3* — разделительный слой; *4* — диафрагма; *5* — основание диафрагмы; *6* — струбцины; *7* — дренажная канавка; *8* — ловушка.

Изделие *2* в форме *1* покрывают разделительным слоем пленки *3*. Плита *5* с закрепленной на ней диафрагмой *4* с помощью струбцин *6* соединяется с формой. При подаче через отверстие в плите сжатого воздуха диафрагма обжимает свободную поверхность изделия, уплотняя его.

При уплотнении изделия диафрагмой под вакуумом диафрагма *4* с помощью струбцин *6* герметично закрепляется по периметру формы *1*. Поверх формуемого изделия *2* наносят разделительный *3* и дренажный *9* слои. По канавкам *7* через ловушку *8* из полости формы откачивают воздух. Диафрагма при этом обжимает поверхность изделия, уплотняя его. Избыток связующего собирается в ловушке *8*. В вакууме облегчается удаление воздуха и летучих из композиции. Дренажный слой (из тканей крупного плетения или пористого картона) способствует полному удалению летучих со всей поверхности изделия.

В описанной разновидности метода в отличие от предыдущих обе стороны изделия оказываются плотно прижатыми к форме или к диафрагме, так что последующей обработки их не требуется. Для обеспечения лучшего качества поверхности изделия, обращенной к диафрагме, а также для большей точности воспроизведения требуемой толщины стенки его между формуемым изделием и эластичной диафрагмой может быть помещена цулага, представляющая собой тонкостенную форму, повторяющую контуры изделия.

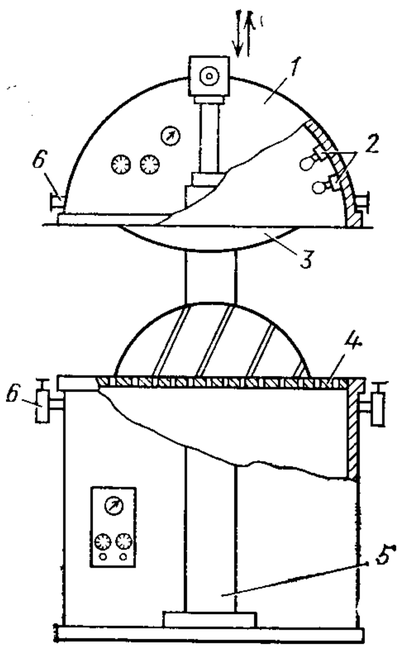


Рис. 11.7. Схема пресса для формования с помощью эластичной диафрагмы:
1 — верхняя плита пресса; *2* — нагревательные элементы; *3* — диафрагма; *4* — перфорированный стол пресса; *5* — пневмоцилиндр; *6* — пневмозажимы.

Диафрагма, как правило, изготавливается из резины и имеет форму, также близкую к контурам изделия.

Формование изделий с габаритными размерами до 1 м осуществляется в основном на специальных прессах (рис. 11.7). Верхняя плита пресса выполнена в виде полого короба *1*, к которому подвешивается резиновая диафрагма *3*. Стол пресса *4* перфорированный, что обеспечивает удаление воздуха из пространства между изделием и диафрагмой. Нагревательные элементы *2* монтируют в верхнем коробе.

Под столом пресса расположены вакуум-насос, компрессор и система управления. Опускается верхняя плита пресса под действием собственного веса, поднимается с помощью двух пневмоцилиндров *5*. Пневмозажимы *6*, расположенные по контуру стола, зажимают диафрагму между его кромкой и коробом. При формовании изделий больших габаритов сложной конфигурации могут использоваться эластичные диафрагмы, которые крепят непосредственно к форме. В этом случае возможно формование как в матрицах, так и на пуансонах.

Сложная конфигурация изделия может вызывать значительную и неоднородную вытяжку диафрагмы, из-за чего возникают большие нагрузки на зажимные канты форм, которые по этой причине целесообразно выполнять более жесткими и утолщенными по сравнению с основным телом формы.

11.3.4. Прессование

Метод прессования обеспечивает высокое качество всех поверхностей изделия, позволяет достаточно точно воспроизводить требуемую толщину стенки изделия.

Если осуществляется прессование предварительно подготовленной композиции стекловолокна и связующего, то метод и оборудование для его реализации практически ничем не отличаются от описанных в гл. 3.

Схема прессования стеклопластиков с совмещением связующего и наполнителя в процессе формования показана на рис. 11.8. На неподвижной плите *1* пресса укрепляют пуансон *2*, на который вначале укладывают требуемое число слоев наполнителя *3*, а затем выливают дозу связующего *4*. При смыкании формы матрица *5*, установленная на подвижной плите *6* пресса, распределяет связующее по всей полости формы, способствуя равномерной пропитке наполни-

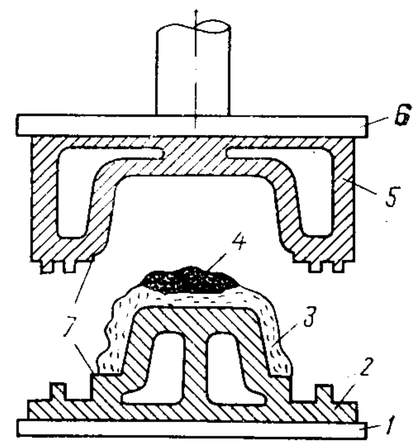


Рис. 11.8. Схема прессования стеклопластиков:
1 — неподвижная плита пресса; *2* — пуансон; *3* — стеклонаполнитель; *4* — связующее; *5* — матрица; *6* — подвижная плита пресса; *7* — пресс-канты.

теля. Излишки наполнителя (облой) по периметру изделия отрезаются пресс-кантами *7* после того, как обе половины формы смыкаются до упоров, высота которых гарантирует получение заданной толщины стенки изделия. Избыток связующего выдавливается из полости формы через зазор между пресс-кантами *7*.

При формовании сложных изделий перед прессованием предварительно изготавливают объемные заготовки наполнителя, по конфигурации соответствующие изделию. Это позволяет исключить длительную, сложную и вредную операцию выкладки наполнителя на пуансоне.

Схема машины для формования объемных заготовок показана на рис. 11.9. Жгут *1*, разматываясь с бобин, поступает в режущее устройство *2*. Рубленые нити длиной 50 мм захватываются потоком воздуха от вентилятора *3* и направляются на перфорированную форму *6*, контуры которой близки к контурам будущего изделия. Под формой с помощью вентилятора *7* создается разрежение, удерживающее попавшие на поверхность формы волóкна. Одновременно на уложенное волокно из пистолета-распылителя *5* подается очень небольшое количество связующего, склеивающего волокна и обеспечивающего формоустойчивость заготовки при снятии ее с формы *6* и помещении в форму пресса.

Связующие, применяемые для прессования с совмещением компонéнтов при формовании, обладают хорошей текучестью, поэтому давление прессования намного меньше, чем при обычном методе прессования (см. гл. 3) и не превышает 2—7 МПа. В соответствии с этим специализированные прессы для стеклопластиков имеют рамы меньшей жесткости и увеличенные размеры подвижной и неподвижной плит. Для более однородного распределения усилия прессования по площади плит подвижная плита оснащается не одним, а несколькими гидроцилиндрами с малым усилием.

Прессы могут снабжаться выдвижными столами для облегчения монтажа форм, укладки наполнителя на пуансон и снятия изделия. Вообще они отличаются большим разнообразием конструкции, обусловленным их специализированным назначением (например, пресс для формования корпусов лодок, имеющий площадь плит 2500×8200 мм при ходе их разъема до 1000 мм).

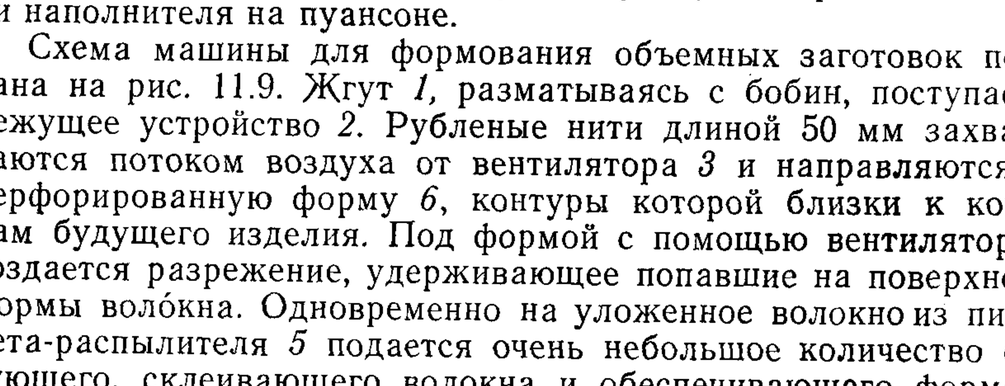
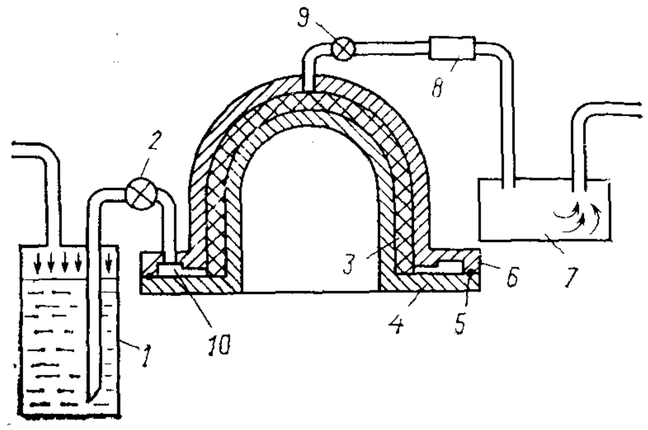


Рис. 11.9. Схема машины для предварительного формования заготовки наполнителя:
1 — стекложгут; *2* — режущее устройство; *3* — вентилятор; *4* — воздуховод; *5* — пистолет-распылитель; *6* — форма; *7* — вентилятор.

Рис. 11.10. Схема пропитки наполнителя под давлением в замкнутой форме:
1 — бак со связующим; *2* — кран; *3* — стеклонаполнитель; *4* — пуансон; *5* — уплотнитель; *6* — матрица; *7* — ловушка; *8* — смотровое окно; *9* — кран; *10* — коллектор.



11.3.5. Пропитка под давлением в замкнутой форме

Одно из достоинств метода пропитки под давлением в замкнутой форме (рис. 11.10) состоит в том, что получаемые изделия практически не содержат воздушных включений. Метод нашел применение при формовании различных оболочек, кузовов автомобилей, емкостей и других изделий. Сущность метода заключается в следующем.

Непропитанный сухой наполнитель *3* выкладывают послойно на пуансон *4*, после чего пуансон *4* и матрица *6* смыкаются. Герметичность полости формы достигается установкой уплотнителя *5*. Ловушку для связующего *7* сообщают с вакуумом, а в бак *1* со связующим подают сверху воздух под давлением 0,3—0,5 МПа. Затем открывают краны *2* и *9*, и связующее из бака *1* устремляется в коллектор *10* формы, откуда начинает пропитку наполнителя, вытесняя из него воздух через кран *9*, смотровое окно *8* и ловушку *7*. По истечении времени пропитки первые порции связующего еще с воздушными пузырьками показываются в смотровом окне *8* и попадают в ловушку *7*. Как только пузырьки воздуха в протекающем мимо окна связующем исчезнут, пропитку можно считать законченной.

Оборудование для реализации этого метода включает в себя установку для подготовки и подачи связующего и формующий инструмент. Конструкция установок для подготовки и подачи связующего практически такая же, как и в предыдущих методах формования.

11.3.6. Намотка

Наибольшее применение метод намотки получил в авиа- и ракетостроении для формования корпусов ракет и реактивных двигателей, а также элементов фюзеляжей самолетов, в хими-

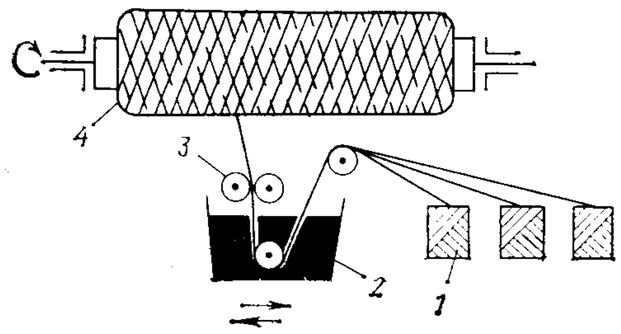


Рис. 11.11. Схема изготовления изделия из стеклопластика методом намотки:

1 — бобины со стекложгутом; *2* — ванна со связующим; *3* — отжимные валики; *4* — оправка.

ческой промышленности для изготовления аппаратов, емкостей и трубопроводов.

Сущность метода намотки, как видно из рис. 11.11, заключается в намотке стекложгута *1*, пропитанного связующим, на вращающуюся оправку *4*. Чтобы обеспечить определенную ориентацию жгута на поверхности оправки, скорость перемещения раскладчика наполнителя (в данном случае роль раскладчика выполняют отжимные валики *3* в ванне *2*) согласуется со скоростью вращения оправки *4*. Содержание компонентов в системе смола — стекловолокно регулируется отжимными валиками. В отличие от описанного «мокрого» метода намотки, «сухой» метод состоит в намотке на оправку предварительно пропитанного и высушенного наполнителя с последующими нагреванием, опрессовкой его, а также выдержкой под давлением для отверждения. Для «мокрой» намотки используются в основном полиэфирные и эпоксидные связующие, а для «сухой» — главным образом фенольные связующие.

Обязательная стадия процесса — отверждение намотанной на оправку заготовки. При этом заготовка может быть дополнительно уплотнена помещением ее вместе с оправкой в резиновый мешок и созданием в нем вакуума. Термообработка связующего может проводиться как в специальных камерах, так и за счет нагревателей, размещенных в самой оправке.

Конструкции намоточных станков весьма разнообразны (рис. 11.12). Наиболее просты по устройству станки с вращающейся оправкой *1* и движущимся возвратно-поступательно раскладчиком *2*, с которого наполнитель подается на оправку (рис. 11.12, *а*). В станках планетарного типа (рис. 11.12, *б*) рас-

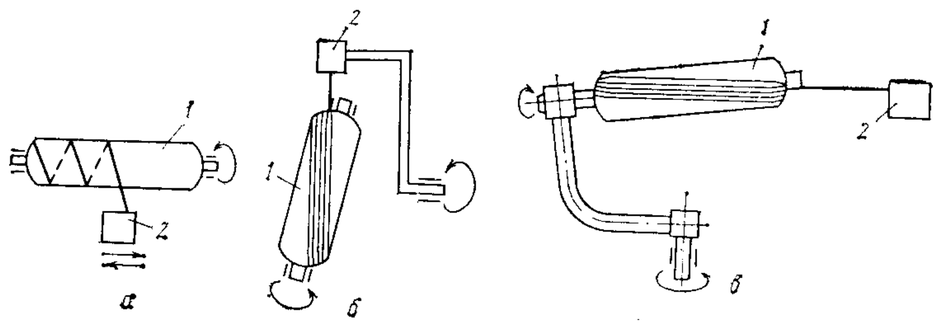
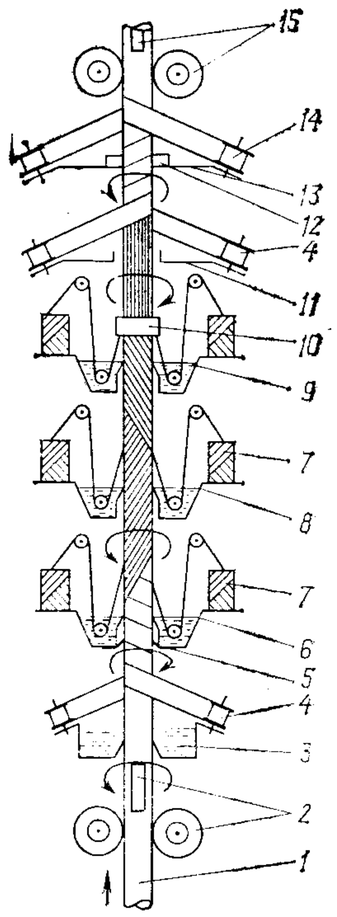


Рис. 11.12. Схемы различных типов намоточных станков. Пояснения в тексте.

Рис. 11.13. Схема вертикальной установки для формования стеклопластиковых труб на движущейся оправке:

1 — оправка; *2* — подающие валики; *3, 6, 8, 11, 13* — вращающиеся столы; *4, 14* — катушки с целлофановой лентой; *5* — эластичная диафрагма; *7* — бобины со стекложгутом; *9* — неподвижный стол; *10* — направляющее устройство; *12* — устройство для удаления натеков связующего; *15* — приемные валики.



кладчик *2* вращается в плоскости, почти совпадающей с осью оправки *1*, которая вращается обычно с очень малой скоростью. В крупных станках такого типа раскладчик иногда движется по замкнутой направляющей. Наконец, в станках третьего типа, применяемых обычно для формования небольших изделий, оправка *1* вращается в двух плоскостях (рис. 11.12, *в*). В этом случае раскладчик *2* неподвижен.

Для производства цилиндрических оболочек и труб используются установки периодического и непрерывного действия. В первых оправка неподвижна, а раскладчик движется по спирали, во вторых установках оправка движется поступательно, а раскладчик — в кольцевом направлении, по окружности (рис. 11.13).

При непрерывном процессе намотка осуществляется на движущуюся снизу вверх оправку *1*, изготовленную из шестиметровых полированных снаружи стальных труб, соединенных встык. Оправка приводится в движение с помощью подающих *2* и приемных *15* центрирующих валиков. Установка имеет шесть столов, через которые проходит оправка. Пять из них (*3*, *6*, *8*, *11* и *13*) вращаются вокруг оправки, а шестой (*9*) неподвижен.

При прохождении через эластичную диафрагму, образующую дно бака со связующим и расположенную на первом столе *3*, оправка покрывается слоем связующего, и уже на этот слой при вращении стола наматывается стекловолокнистая лента *4*. Расположенная в центре второго стола *6* эластичная диафрагма *5* отжимает излишки связующего, и на поверхность оправки наматывается стекложгут *7*, пропитанный в кольцевой ванне. Аналогичный процесс происходит при прохождении оправки через третий стол *8*, но этот стол вращается в противоположную сторону. На четвертом, не вращающемся столе *9* происходит укладка продольного слоя стекложгутов. При этом пропитанный стекложгут, образующий данный слой, проходит направляющее устройство *10*, обеспечивающее равномерное распределение жгута вокруг трубы. На пятом столе *11* наматывается наружный слой стекловолокнистой ленты подобно тому, как это делается на первом столе, но с противоположным на-

правлением вращения. Намотка осуществляется при натяжении ленты, которое способствует отжатию излишков связующего и уплотнению стенки формуемой трубы. На шестом, вращающемся столе *13* с помощью деревянных лопаток *12* снимаются натеки смолы и производится намотка целлофановой ленты с катушек *14*. После выхода из центрирующих валиков *15* отформованная труба разрезается в местах стыка оправок и отправляется в вертикальные паровые камеры для отверждения связующего. Отвержденные трубы снимаются затем с оправок. На установках такого типа могут изготавливаться трубы с внутренним диаметром от 50 до 150 мм. Установка монтируется в башне высотой 22 м.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Оборудование для переработки пластмасс. Справочное пособие/Под ред. В. К. Завгороднего. М., Машиностроение, 1976. 407 с.

Техника переработки пластмасс./Под ред. Н. И. Басова и В. Броя. М., Химия, 1985. 528 с.

Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров. М., Химия, 1977. 464 с.

Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ./Под ред. Р. В. Торнера. М., Химия, 1984. 640 с.

К главе 1

Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов. Л., Химия, 1983. 288 с.

Теплофизические и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов. Справочник./Под ред. Ю. С. Липатова. Киев, Наукова думка, 1983. 279 с.

Басов Н. И., Любартович В. А., Любартович С. А. Контроль качества полимерных материалов. Л., Химия, 1977. 96 с.

К главе 2

Кольман-Иванов Э. Э., Салазкин К. А. Таблеточные машины. М., Машиностроение, 1966. 288 с.

Кольман-Иванов Э. Э. Таблетирование в химической промышленности. М., Химия, 1976. 200 с.

Завгородний В. К. Механизация и автоматизация переработки пластических масс. М., Машиностроение, 1970. 402 с.

К главе 3

Брагинский В. А. Прессование. Л., Химия, 1973. 98 с.

Розанов Б. В. Гидравлические прессы. М., Машгиз, 1958. 423 с.

К главе 4

Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М., Машиностроение, 1965. 363 с.

Остапчук Ю. Г. и др. Дисковые экструдеры. Киев. Техника, 1972. 131 с.

Самойлов А. В. Тепловые расчеты червячных и валковых машин. М., Машиностроение, 1978. 152 с.

Лукач Ю. Е., Петухов А. Д., Сенатос В. А. Оборудование для производства полимерных пленок. М., Машиностроение. 1981. 221 с.

Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. М., Машиностроение, 1972. 271 с.

К главе 5

Басов Н. И., Казанков Ю. В. Литьевое формование полимеров. М., Химия, 1984. 248 с.

Леонов А. И., Басов Н. И., Казанков Ю. В. Основы переработки реактопластов и резин методом литья под давлением. М., Химия, 1977. 216 с.

Завгородний В. К., Калинчев Э. Л., Марам Е. И. Литьевые машины для переработки термопластов и реактопластов. М., Машиностроение, 1968. 376 с.

К главе 6

Басов Н. И., Ким В. С., Скуратов В. К. Оборудование для производства объемных изделий из термопластов. М., Машиностроение, 1972. 217 с.

Басов Н. И., Скуратов В. К. Раздувное формование. Л., Химия, 1983. 75 с.

К главе 7

Салазкин К. А., Шерышев М. А. Машины для формования изделий из листовых термопластов. М., Машиностроение, 1977. 158 с.

Стрельцов К. Н. Переработка термопластов методами механопневмоформования. Л., Химия, 1981. 231 с.

К главе 9

Лукач Ю. Е., Рябинин Д. Д., Метлов Б. Н. Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей. М., Машиностроение, 1967. 295 с.

К главе 10

Бекин Н. Г., Шанин Н. П. Оборудование заводов резиновой промышленности. Л., Химия, 1978. 398 с.

Карпов В. Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности. М., Химия, 1979. 480 с.

Бекин Н. Г., Петров Б. М. Оборудование для изготовления пневматических шин. Л., Химия, 1982. 263 с.

К главе 11

Макаров М. С., Казанков Ю. В. Производство изделий из стеклопластиков. Л., Химия, 1973. 79 с.

Калиничев В. А., Макаров М. С. Намотанные стеклопластики. М., Химия, 1985. 220 с.

Цыплаков О. Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек. Л., Машиностроение, 1968. 174 с.

Николай Иванович Басов
Юрий Васильевич Казанков
Валерий Анатольевич Любартович

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Редактор *Л. И. Галицкая*
Художественный редактор *Н. В. Носов*
Технический редактор *В. М. Скитина*
Корректор *Т. С. Васина*

ИБ № 1608

Сдано в наб. 16.07.85. Подп. в печ. 25.11.85. Формат 60×90¹/₁₆.
Бумага кн. журнальная. Гарн. литературная.
Печать высокая. Усл. печ. л. 30,5. Усл. кр.-отт. 30,5.
Уч.-изд. л. 32,78. Тираж 5500 экз. Заказ 1281. Цена 1 р. 40 к.
Изд. № 2581.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия»,
107076, Москва, Стромынка, 21.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 113105, Нагатинская ул., 1.