

Вальтер Микаэли

**ЭКСТРУЗИОННЫЕ ГОЛОВКИ
ДЛЯ ПЛАСТМАСС И РЕЗИНЫ:
Конструкции и технические расчеты**

При участии:

Ульриха Домбровски, Ульриха Хюзгена, Маттиаса
Кальва, Стефана Кауля, Микаэля Майера, Бориса
Роттера, Клауса Швенцера

*Перевод с английского языка
3-го переработанного издания
под редакцией канд. техн. наук В. П. Володина*

Санкт-Петербург

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПРОФЕССИЯ

2007

УДК 678.06
ББК 35.710Англ
М59

М59 **Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты** / Пер. с англ. яз.; Под. ред. В.П. Володина. — СПб.: Профессия, 2007. — 472 стр., ил.

ISBN 5-93913-108-5
ISBN 3-446-22561-8 (англ.)

Книга представляет собой попытку дать широкое описание современного состояния технологий конструирования экструзионных головок. Она задумана и как учебное пособие, которое может использоваться студентами, и как справочник, который инженеры-практики могли бы использовать в повседневной работе. В издании рассмотрены различные типы экструзионных головок, обсуждаются их отличительные черты, а также приведены указания и советы по их конструированию. Кроме того, описаны инженерные методы, применяемые для численного моделирования экструзионных головок.

Приведена обзорная информация о термических и механических параметрах экструзионных головок и рекомендации по выбору материалов для их изготовления. Рассмотрена практика эксплуатации экструзионных головок и измерительных устройств для экструдированных труб и профильных изделий, их очистки и технического обслуживания.

УДК 678.06
ББК 35.710Англ

*All right reserved. Carl Hanser Verlag, Munich/FRG.
Authorized translation from the original English language edition published by
Carl Hanser Verlag, Munich/FRG*

Все права защищены.

Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена
в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 5-93913-108-5
ISBN 3-446-22561-7 (англ.)

© Carl Hanser Verlag, Munich, 2003
© Кокорева О., перевод, 2006
© Изд-во «Профессия», 2007

Содержание

Предисловие к третьему изданию	9
Предисловие к русскому изданию	11
1. Введение	13
Используемые обозначения	20
2. Свойства полимерных расплавов	21
2.1. Реологические характеристики	21
2.1.1. Вязкостные свойства расплавов	22
2.1.1.1. Вязкость и функции течения	22
2.1.1.2. Математическое описание псевдопластичного поведения расплавов	24
2.1.1.3. Влияние температуры и давления на поведение потока	30
2.1.2. Определение поведения вязкости потока	37
2.1.3. Вязкоупругие свойства расплавов	43
2.2. Термодинамические свойства	49
2.2.1. Плотность	50
2.2.2. Теплопроводность	50
2.2.3. Удельная теплоемкость	52
2.2.4. Температуропроводность	53
2.2.5. Удельная энтальпия	54
3. Основные уравнения для простых течений	59
3.1. Течение в трубе круглого сечения	61
3.2. Течение через щелевой канал	65
3.3. Течение через кольцевой зазор	68
3.4. Справочная информация для расчета экструзионных головок с каналами различной геометрической формы	71
3.5. Явление проскальзывания на стенках	81
3.5.1. Модель, учитывающая явление проскальзывания на стенках	82
3.5.2. Нестабильность течения — разрушение потока расплава	85
4. Расчет распределений скоростей и температур в экструзионных головках ...	91
4.1. Уравнения законов сохранения	91
4.1.1. Уравнение неразрывности	92
4.1.2. Уравнения импульса	93

4.1.3.	Уравнение энергии	94
4.2.	Допущения и граничные условия	97
4.3.	Аналитические решения уравнений законов сохранения	100
4.4.	Численное решение уравнений законов сохранения	106
4.4.1.	Метод конечных разностей	106
4.4.2.	Метод конечных элементов	110
4.4.3.	Сравнение методов конечных разностей и конечных элементов	114
4.4.4.	Примеры расчетов методом конечных разностей	118
4.4.5.	Примеры расчетов методом конечных элементов	125
4.5.	Вязкоупругое поведение расплава	130
4.6.	Расчет разбухания экструдата	133
4.7.	Методы конструирования и оптимизации экструзионных головок	141
4.7.1.	Практика промышленного конструирования экструзионных головок	141
4.7.2.	Параметры оптимизации	145
4.7.2.1.	Практические цели оптимизации	145
4.7.2.2.	Практические граничные условия и ограничения при конструировании каналов	147
4.7.2.3.	Независимые параметры оптимизации экструзионных головок	147
4.7.2.4.	Зависимые параметры оптимизации и их моделирование	147
4.7.3.	Методы оптимизации	150
4.7.3.1.	Безградиентные методы оптимизации	153
4.7.3.2.	Градиентные методы оптимизации	155
4.7.3.3.	Стохастические методы оптимизации	155
4.7.3.4.	Эволюционные методы	156
4.7.3.5.	Обработка граничных условий	158
4.7.4.	Практические применения стратегий оптимизации при конструировании экструзионных головок	160
4.7.4.1.	Оптимизация экструзионной головки с сужающимся каналом	160
4.7.4.2.	Оптимизация профильных головок	151
5.	Моноэкструзионные головки для термопластов	172
5.1.	Экструзионные головки с круглым поперечным сечением	172
5.1.1.	Конструкции и области применения	172
5.1.2.	Конструирование	179
5.2.	Щелевые экструзионные головки	185
5.2.1.	Конструкции и применения	185
5.2.2.	Конструирование	193
5.2.2.1.	Коллектор типа «рыбий хвост»	195
5.2.2.2.	Коллектор типа «вешалка»	196
5.2.2.3.	Численные методы расчета	207
5.2.2.4.	Учет изменения размеров внутренней полости головки	209
5.2.2.5.	Нестандартные коллекторы	210
5.2.2.6.	Эксплуатация широкощелевых экструзионных головок	213
5.3.	Экструзионные головки с кольцевым выходным поперечным сечением	216
5.3.1.	Типы кольцевых головок	217
5.3.1.1.	Прямоточные головки с дорнодержателем	217
5.3.1.2.	Экструзионные головки с ситчатой корзиной	221
5.3.1.3.	Экструзионные головки с боковой подачей расплава	222
5.3.1.4.	Головки со спиральным распределителем	223
5.3.2.	Области применения	225

5.3.2.1. Экструзионные головки для производства труб	225
5.3.2.2. Головки для производства рукавной пленки	227
5.3.2.3. Головки для изготовления заготовок при экструзии с раздувом	229
5.3.2.4. Экструзионные головки для нанесения покрытий на сердечники	236
5.3.3. Конструирование	239
5.3.3.1. Прямоточные головки с дорном и головки с ситчатой корзиной	240
5.3.3.2. Экструзионные головки с дорном и боковой подачей расплава ..	243
5.3.3.3. Головки со спиральным распределителем на дорне	247
5.3.3.4. Головки для нанесения покрытий	251
5.4. Формулы для расчета перепада давления в каналах, имеющих форму поперечного сечения, отличную от круглой или кольцевой	254
5.5. Головки с произвольной формой сечения (профильные головки)	259
5.5.1. Конструкции и области применения	259
5.5.2. Конструирование	268
5.6. Головки для экструзии вспененных полуфабрикатов	277
5.6.1. Экструзионные головки для производства вспененных пленок	278
5.6.2. Головки для вспененных профилей	279
5.7. Специализированные экструзионные головки	282
5.7.1. Экструзионные головки для нанесения покрытий на профили с произвольной формой поперечного сечения	282
5.7.2. Экструзионные головки для производства армированных профилей ..	283
5.7.3. Экструзионные головки для производства сеток	284
5.7.4. Щелевая головка с распределительным шнеком для изготовления плит	284
6. Головки для соэкструзии термопластов	294
6.1. Конструкции	295
6.1.1. Соэкструзионные головки с внешним комбинированием	295
6.1.2. Головки с адаптером (блоком подачи расплава)	296
6.1.3. Многоколлекторные головки	298
6.2. Области применения	300
6.2.1. Головки для экструзии листов и плоской пленки	300
6.2.2. Головки для изготовления рукавной пленки	300
6.2.3. Головки для получения многослойных заготовок при экструзии с раздувом	301
6.3. Расчет многослойных течений и конструирование головок	302
6.3.1. Расчет простого многослойного течения при условии постоянства вязкости	305
6.3.2. Расчет соэкструзионного течения с помощью явной разностной схемы	310
6.3.3. Расчет полей скорости и температуры методом конечных разностей ...	313
6.3.4. Расчет полей скорости в соэкструзионных течениях методом конечных элементов	316
6.4. Нестабильности при многослойном течении	318
7. Экструзионные головки для эластомеров	327
7.1. Конструкция головок для экструзии эластомеров	327
7.2. Основы конструирования экструзионных головок для эластомеров	329
7.2.1. Термодинамические свойства материалов	329

7.2.2. Реологические свойства материалов	330
7.2.3. Расчет потерь давления за счет вязкости	333
7.2.3.1. Формулы для расчета изотермических течений	334
7.2.3.2. Подходы к расчету неизотермических течений	336
7.2.4. Оценка пиковых температур	337
7.2.5. Учет упругих свойств материала	338
7.3. Конструирование распределительных головок для эластомеров	339
7.4. Конструирование blends экструзионных головок для эластомеров	340
7.4.1. Расчет потерь давления	340
7.4.2. Разбухание экструдата	344
7.4.3. Упрощенные оценки при конструировании прорезного диска	348
8. Нагрев экструзионных головок	358
8.1. Типы головок и области их применения	359
8.1.1. Жидкостной нагрев экструзионных головок	359
8.1.2. Экструзионные головки с электрическим нагревом	360
8.1.3. Регулирование температуры экструзионных головок	362
8.2. Конструирование систем нагрева	363
8.2.1. Критерии и возможности при конструировании систем нагрева	364
8.2.2. Тепловой баланс в экструзионной головке	366
8.2.3. Ограничения и допущения при разработке тепловой модели	371
8.2.4. Методы моделирования процессов теплообмена	372
9. Механические расчеты экструзионных головок	383
9.1. Механический расчет решетки [1]	384
9.2. Механические расчеты экструзионных головок с осесимметричными каналами	389
9.3. Механические расчеты щелевой экструзионной головки	399
9.4. Общие принципы конструирования	402
9.5. Выбор материалов для изготовления экструзионных головок	404
10. Содержание, чистка и эксплуатация экструзионных головок	412
11. Калибрование труб и профилей	417
11.1. Типы калибрования и их применение	420
11.1.1. Калибрование трением	420
11.1.2. Наружное калибрование с помощью сжатого воздуха	421
11.1.3. Наружное калибрование с помощью вакуума	422
11.1.4. Внутреннее калибрование	427
11.1.5. Высокоточное калибрование протяжкой (процесс Техноформ)	428
11.1.6. Специальные методы калибрования с подвижными калибраторами	429
11.2. Тепловые расчеты калибраторов	430
11.2.1. Аналитическая расчетная модель	431
11.2.2. Численная модель	434
11.2.3. Аналоговая модель	440
11.2.4. Граничные условия по температуре и характеристики материалов	443
11.3. Влияние охлаждения на качество экструдата	444
11.4. Механические расчеты калибрующих устройств	445
11.5. Охлаждаемые головки, процесс производства сплошных стержней	446
Алфавитно-предметный указатель	450

Предисловие к третьему изданию

Во время моего последнего визита в Медельин (Колумбия) по поводу 10-летнего юбилея *ICIPC*, успешно развивающегося научно-исследовательского института по исследованию технологий переработки пластмасс и резины, я встретил большую группу студентов-энтузиастов, которые учились по моей книге, посвященной конструированию экструзионных головок. Эта встреча доставила мне огромное удовольствие, во-первых, потому что показала, что моя книга получила широкое признание не только в моем родном городе, но и далеко за его пределами. Во-вторых, было чрезвычайно приятно почувствовать, что все эти молодые люди с удовольствием учились по моей книге и нашли ее полезной для повышения своего профессионального уровня. Однако моя книга была задумана не просто как учебное пособие, но и как практический справочник, предназначенный для повседневного использования в практической работе как в промышленности, так и в научной деятельности. С момента выхода второго издания книги прошло двенадцать лет, и за этот срок в области конструирования экструзионных головок произошли серьезные изменения, появилось множество технологических нововведений. Например, головки со спиральным распределителем существуют уже более тридцати лет, однако с момента выхода второго издания книги некоторые из их функций претерпели изменения. В настоящее время спиральный распределитель размещают на плоской поверхности, а подача расплава в него осуществляется сбоку. Если такие системы устанавливать одна на другую, то получается так называемая головка с копильником, предоставляющая ряд преимуществ по сравнению с классическими головками с кольцевой щелью для соэкструзии. Эти новшества рассмотрены в главе 5.

Компьютерная обработка всех данных, включая параметры материала, параметры технологического процесса, а также геометрическую конфигурацию конечного изделия, — это мечта каждого разработчика экструзионных головок. Такой подход позволил бы получить окончательную версию конструкции канала экструзионной головки, обеспечивающего оптимальное распределение параметров полимерного расплава. Данная книга показывает, что хотя анализ с использованием метода конечных элементов является ключом к достижению

этой цели, получение точного описания вязкоупругих свойств экструдированного материала все еще представляет собой чрезвычайно сложную реологическую и инженерную задачу. Тем не менее существенный прогресс был достигнут и в этом направлении. Например, для течений вязкой жидкости заявленная цель почти достигнута. В связи с этим в третье издание книги была включена новая глава, посвященная численным методам оптимизации экструзионных головок.

Я счастлив выразить огромную благодарность моим коллегам из Института по переработке пластмасс в Аахене — дипломированным инженерам Борису Роттеру, возглавляющему отдел экструзии, и Стефану Каулу, инженеру-исследователю этого отдела, за их поддержку и активную помощь в процессе переработки и редактирования данной книги. Многие результаты, представленные в книге, были получены студентами Института в ходе работы над дипломными проектами.

Кроме того, я от всего сердца благодарю членов консультативных комитетов по экструзии, раздувному формованию и технологии переработки резин Института по переработке пластмасс в Аахене за множество ценных замечаний, которые помогли улучшить данную книгу. В основу книги положены результаты, достигнутые в ходе осуществления множества исследовательских проектов, реализованных в Институте. Осуществление этих проектов стало возможным за счет сотрудничества между Институтом и рядом промышленных предприятий, а также за счет поддержки и финансирования, полученных от ряда правительственных организаций: объединенного союза промышленников (Кельн), Немецкого союза промышленников (Бонн–Бад-Годесберг), Федерального министерства образования, науки и технологии (Берлин), а также Еврокомиссии (Брюссель). Наконец, выражаю особую благодарность Доктору Вольфгангу Гленцу из издательства *Hanser* (Мюнхен) за многолетнее плодотворное сотрудничество, интуицию и понимание. Такое понимание особо ценится техническими писателями вроде меня, которые помимо написания книг занимаются и работой по своей основной профессии. Только благодаря помощи и поддержке всех перечисленных выше коллег написание этой книги и стало возможным.

Вальтер Микаэли

Предисловие к русскому изданию

В предисловии к третьему изданию автор отмечает, что его книга получила широкое признание во всем мире. Она полезна не только для студентов при изучении технологии переработки пластмасс и основ конструирования технологической оснастки для производства экструзионных изделий из пластмасс и эластомерных материалов, но и является справочником для практической работы в промышленности и в научной деятельности. И это действительно так. За весь период развития технологии переработки пластмасс эта книга является первой и единственной, где в полной мере представлен весь цикл разработки экструзионных головок для производства самых разных видов погонажных изделий из полимеров, начиная от научных аспектов течения вязких жидкостей как сплошной среды, и заканчивая вопросами изготовления, испытания и эксплуатации головок.

Экструзионная оснастка, включающая экструзионную головку и устройства для калибрования и охлаждения изделий, представляет собой важнейшую часть экструзионной линии. Ее значение можно было бы признать доминирующим, но для непрерывного процесса нельзя умалять значение всех составляющих линии и инфраструктуры, в которой осуществляется производство изделий. О предприятии автор говорит только в аспекте монтажа–демонтажа головок и их обслуживании, а вопросы подготовки материалов к переработке, их транспортировки, смешения, окраски и прочие важные вопросы организации производства остаются в стороне, поскольку они непосредственно не касаются основной темы. Однако приводимые здесь рекомендации показывают, насколько бережно следует относиться к таким сложным и дорогим устройствам, как экструзионные головки, особенно большого размера.

Очень полезными представляются главы, касающиеся нагрева экструзионных головок, выбора материалов для изготовления деталей головок и калибраторов, механические расчеты головок. В отечественно литературе подобные работы немногочисленны и были опубликованы в 1960–70 годы. Поэтому достаточно полное изложение материала по упомянутым аспектам может оказаться весьма полезным для разработчиков оснастки и технологов. При выборе сталей для изготовления оснастки, являющихся отечественными аналогами приводимых в главе 9 марок, может оказаться весьма полезной книга (перевод с немецкого) «Ключ к сталям», опубликованная издательством «Профессия» в 2006 г.

Слабее других написана глава, посвященная оснастке для производства профильных изделий. Здесь, в основном, приводятся ссылки на достаточно старые работы и на конструкции головок и калибраторов, которые за последние годы претерпели значительные изменения. Нет ссылок на известных современных производителей экструзионной оснастки для производства профильных изделий в Германии, Австрии, Италии, США и др. Здесь просматриваются предпочтения автора к выбору цитируемых ссылок.

Книга В. Микаэли знакома русскому читателю по английскому переводу 2-го издания, однако распространенность английского перевода была ограниченной. Потребность в подобной книге достаточно высока, особенно сейчас, когда стали появляться небольшие предприятия по переработке пластмасс, компетентность работников которых не всегда удовлетворяет современным требованиям производства. Перевод 3-го издания книги поможет восполнить этот пробел.

Периоды между изданиями были достаточно продолжительными (1983–1991–2003 гг.). За это время в быстро развивающейся области переработки пластмасс произошли довольно значительные изменения. Особенно это касается 1990-х гг. — периода бурного развития информационных технологий

и повсеместного использования персональных компьютеров в практической работе. И автор не мог не откликнуться на веление времени. В книгу включена новая глава, посвященная численным методам анализа процессов, протекающих в каналах экструзионных головок и при калибровании – охлаждении профильных изделий, и оптимизации конструкций головок. Подробно разобраны методы оптимизации, подходы к их выбору и использованию. К сожалению, в книге встречаются фразы, которые для нашего времени можно признать анахронизмом. Например, попадаются ссылки на использование программируемого калькулятора при проведении достаточно простых расчетов. Верит ли сам автор в целесообразность такой рекомендации, когда персональный или карманный компьютер стал для инженера таким же распространенным и обычным инструментом, как логарифмическая линейка в предшествующие годы. Разумеется, это нельзя отнести к позиции автора книги, а объяснить можно лишь недостаточно внимательным отношением к ее содержанию при подготовке нового издания.

Еще хотелось бы обратить внимание на практически полное отсутствие ссылок на русскоязычных авторов. Имеющиеся немногочисленные ссылки на отечественные работы относятся к публикациям в международных англоязычных журналах или к работам, которые автор использовал при подготовке первого издания книги. Вклад советских и российских исследователей в развитие технологии переработки пластмасс, в исследования процессов формования изделий из расплава и в конструирование технологической оснастки довольно значителен, но он почти не находит отражения в книге.

В связи с этим в конце книги приводится дополнительный перечень литературы (естественно, далеко не полный), включающий переводы на русский язык известных зарубежных авторов и работы советских и русских исследователей. Такой перечень может оказаться полезным для молодых специалистов и зрелых практиков для расширения их кругозора и составления общей картины о развитии направления за последние 50 лет. В список включены также работы, относящиеся к свойствам полимерных материалов и к научным основам технологии экструзии пластмасс, без знания которых немислимо грамотное и целенаправленное конструирование экструзионной оснастки. Включены также некоторые работы по обработке металлов под давлением, из которых можно почерпнуть много полезных сведений для расчета и конструирования экструзионных головок и калибрующих устройств. Хотелось бы также обратить внимание читателя, что эти публикации могут оказаться полезными при рассмотрении многих вопросов течения и деформирования жестких пластмасс, с учетом специфики свойств полимерных материалов.

В последней главе рассматриваются вопросы калибрования и охлаждения экструдированных изделий. В значительной мере здесь использованы ссылки на достаточно старые работы 1970–80 гг., и лишь некоторые датированы 1990-ми гг. Обращает внимание, что здесь расчеты касаются лишь распределения температур в толще стенок калибруемого и охлаждаемого изделия. И ни в коей мере не оцениваются количественно деформационные процессы, протекающие перед калибратором и в самом калибрующем устройстве, не дается оценка усадочных явлений (кроме некоторых практических рекомендаций) и нет ссылок на немногочисленные работы в этой области. Эти вопросы весьма сложны для расчетов, так как представляют нестационарные процессы с фазовыми переходами, о чем автор упоминает, но исследований в этой области немного. И касаются они больше возникновения и расчета внутренних напряжений, возникающих при неравномерном охлаждении экструдата.

Несмотря на некоторые пробелы, естественные для книги в такой относительно молодой и еще недостаточно изученной области как конструирование головок и калибраторов для производства изделий из пластмасс и резины, в книге много полезных рекомендаций и уравнений, которые могут быть с успехом использованы технологами и конструкторами при разработке новых технологических процессов и освоении производства разнообразных изделий.

Валентин Володин

1. Введение

При изготовлении полуфабрикатов из термопластов экструзией центральное место занимают два узла — экструзионная головка (*extrusion die, extruder head*), осуществляющая формование заготовки из расплава (экструдат), и калибратор (*former*). Калибратор обычно устанавливается за экструзионной головкой и выполняет функции направляющего устройства, осуществляющего пластическое деформирование экструдата, обеспечивающего требуемые размеры и производящего охлаждение до заданной температуры (рис. 1.1 и 1.2).

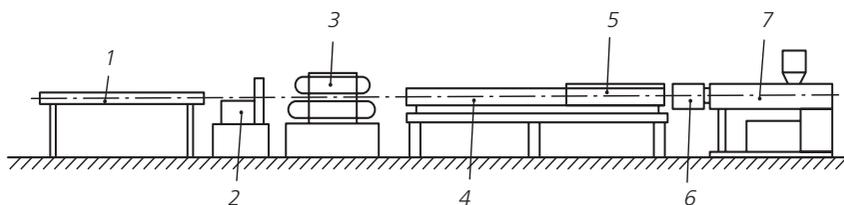


Рис. 1.1. Схема производственной линии для производства профилей методом экструзии: 1 — приемное устройство (накопитель), 2 — режущее устройство, 3 — тянущее устройство, 4 — зона охлаждения, 5 — зона калибрования экструдата, 6 — экструзионная головка, 7 — экструдер

При экструзии эластомерных материалов, в отличие от экструзии термопластов, размеры конечного продукта существенно зависят от геометрии экструзионной головки¹. Некоторые изменения формы и размеров конечного продукта происходят тогда,

¹ То же относится к экструзии формоустойчивых высоковязких расплавов термопластов (например, пластифицированного ПВХ), к которым не применяют калибрование экструдата в обычном понимании этого термина вследствие высокой адгезии расплава к металлу калибрующего устройства. — *Примеч. науч. ред.*

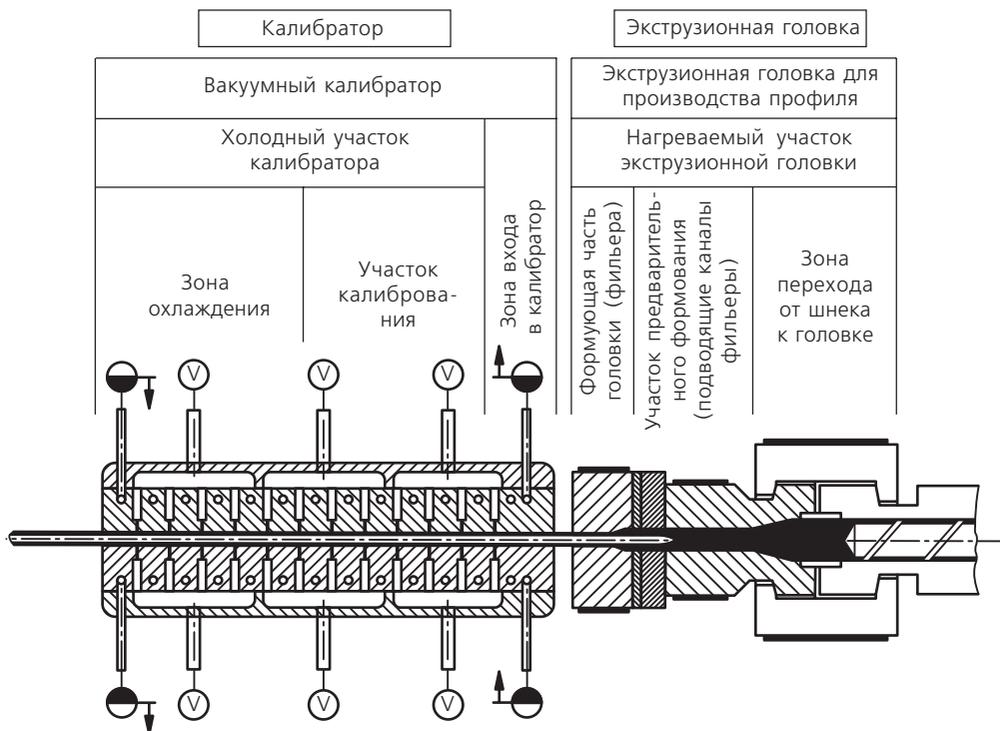


Рис. 1.2. Функциональные участки экструзионной головки и калибратора (по данным *Reifenhauser GmbH + Co., Troisdorf*)

когда после выдавливания расплава из головки осуществляется вулканизация экструдата. В основном эти изменения происходят вследствие образования поперечных связей в материале, особенно если допускается свободная усадка экструдата. Предполагается, что производительность потока расплава на выходе из экструдера является достаточной. При этом сам поток непulsирующий, воспроизводимый, а также механически и термически однородный. С другой стороны, экструзионная головка и калибратор определяют размеры получаемых полуфабрикатов. В связи с этим необходимо учитывать, что решающее влияние на качество экструдированных изделий (например, состояние поверхности и механические свойства) оказывают следующие факторы:

- реологические и термодинамические процессы, протекающие в экструзионной головке и калибраторе;
- процессы вытягивания, которые могут иметь место на участке между экструзионной головкой и калибратором, а также на участках входа в формующую часть фильеры и в калибратор.

При разработке технологичных конструкций экструзионных головок и калибраторов необходимо рассматривать связь между расходом, деформацией и температурой на обоих участках производственной линии. При выборе аналитического подхода к описанию физических процессов доля опытной стадии при конструировании

экструзионной головки и калибратора может быть уменьшена, поскольку все конструктивные изменения, например, в геометрии каналов экструзионной головки, могут быть оценены непосредственно. Эта оценка производится в зависимости от рабочего режима, реологических и термодинамических свойств перерабатываемого полимера, с учетом процессов формования и охлаждения экструдата. Таким образом, аналитический подход дает возможность создавать более совершенные конструкции экструзионных головок и калибраторов.

Целью данной книги является подробное описание инженерных методов, используемых при конструировании экструзионных головок и калибраторов, причем основное внимание уделяется экструзионным головкам. Приводятся основные правила конструирования головок и дается описание простых математических методов, соответствующих практическим требованиям. Кроме того, приводятся многочисленные ссылки на отдельные экструзионные головки и калибраторы специфической конструкции. Особо подчеркиваются различия между конструкциями экструзионных головок, предназначенных для переработки эластомерных и термопластичных материалов.

В процессе разработки и конструирования экструзионных головок и калибраторов возникает необходимость рассматривать проблему с точки зрения реологии, термодинамики, производства и эксплуатации [1].

Эксплуатационные аспекты включают, например, обеспечение механической жесткости экструзионной головки, достаточной для поддержания на минимальном уровне изменения выходного поперечного сечения формирующего инструмента вследствие воздействия давления расплава; простые способы установки и демонтажа головки и калибратора, а также возможность удобной очистки экструзионной головки. Кроме того, большое значение имеют уменьшение количества стыковых поверхностей в экструзионных головках, их герметизация, а также конструкция герметичного и легко демонтируемого соединения между экструдером и головкой (адаптера) [1].

Производственные аспекты должны приниматься во внимание при конструировании отдельных деталей экструзионных головок и калибраторов в целях максимально возможного снижения затрат на изготовление технологической оснастки. Уменьшение затрат может быть достигнуто, например, за счет использования материалов, хорошо поддающихся механической обработке, полировке и термообработке, а также за счет применения отработанных технологий машиностроительного производства.

При рассмотрении *реологических аспектов* требуется ответить на следующий вопрос [1]: какими должны быть размеры поперечного сечения канала экструзионной головки на выходе, чтобы обеспечить выполнение следующих требований:

- достижение требуемой производительности при заданном давлении экструзии (возможно также рассмотрение обратной задачи);
- обеспечение одинаковой средней скорости течения расплава по всему поперечному сечению канала на выходе;
- обеспечение требуемой геометрии экструдата для неосесимметричных заготовок (которая может искажаться за счет вязкоупругих эффектов);

- обеспечение гладкой поверхности экструдата и/или поверхностей раздела между различными слоями расплава даже при высокой производительности, так как при больших скоростях сдвига может произойти разрушение экструзионного потока¹;
- устранение застойных зон и исключение деполимеризации или разложения расплава, которые частично связаны с наличием застойных зон в потоке (соблюдение этого требования зависит от времени пребывания материала в канале экструзионной головки и от температур, существующих в нем).

С точки зрения *термодинамических аспектов* проблемы, тесно связанных с реологическими аспектами, необходимо получить информацию о максимальных температурах, которые могут наблюдаться в потоке расплава в канале экструзионной головки на основе существующих представлений о теплопередаче и диссипации энергии, особенно при рассмотрении термочувствительных полимерных материалов. Здесь же рассматриваются способы регулирования температуры расплава и обеспечения ее равномерного распределения по поперечному сечению каналов экструзионной головки и калибратора.

Как правило, не все перечисленные выше требования могут быть обеспечены одновременно и одинаково успешно. Это относится как к экструзионной головке, так и к калибратору. По этой причине необходимо установить и распределить приоритеты. Например, при конструировании гранулирующей экструзионной головки (грануляция на перфорированной решетке), следует стремиться к достижению максимально возможной пропускной способности, тогда как при производстве кабельной изоляции главное — это качество поверхности [1].

При рассмотрении этих требований, однако, необходимо принимать во внимание, что экструдер и экструзионная головка тесно взаимодействуют при работе. Это особенно справедливо при применении традиционного одношнекового экструдера с гладким материальным цилиндром и трехзонным шнеком. На рис. 1.3 видно, что увеличение сопротивления экструзионной головки при постоянной скорости вращения шнека может привести к заметному снижению объемного расхода. Поэтому перепад давления в экструзионной головке важен с точки зрения механической прочности корпуса головки и крепежных болтов, ее стягивающих, а также достигаемой пропускной способности. (Примечание: во многих случаях производительность экструзионной линии ограничивается не столько выбранной конструкцией экструзионной головки или экструдера, сколько интенсивностью и степенью охлаждения, достигаемой в калибраторе и зоне охлаждения. Например, толстостенные или сплошные стержни изготавливают с помощью экструдеров, имеющих небольшой диаметр шнека)². Более того, в условиях адиабатического процесса температура расплава в экструзионной

¹ Огрубление поверхности, искажение формы струи и др. виды эластической турбулентности, которые называют иногда разрушением потока расплава. — *Примеч. науч. ред.*

² Чтобы при малой производительности обеспечить продолжительное время охлаждения. — *Примеч. науч. ред.*

головке повышается вследствие внутреннего трения расплава и диссипации выделяемого тепла. Соотношение между изменением температуры и перепадом давления в данном случае выражается хорошо известным уравнением:

$$\Delta T = \frac{\Delta p}{\rho c_p}, \quad (1.1)$$

где ΔT — изменение (прирост) температуры; Δp — падение давления; ρ — плотность; c_p — удельная теплоемкость

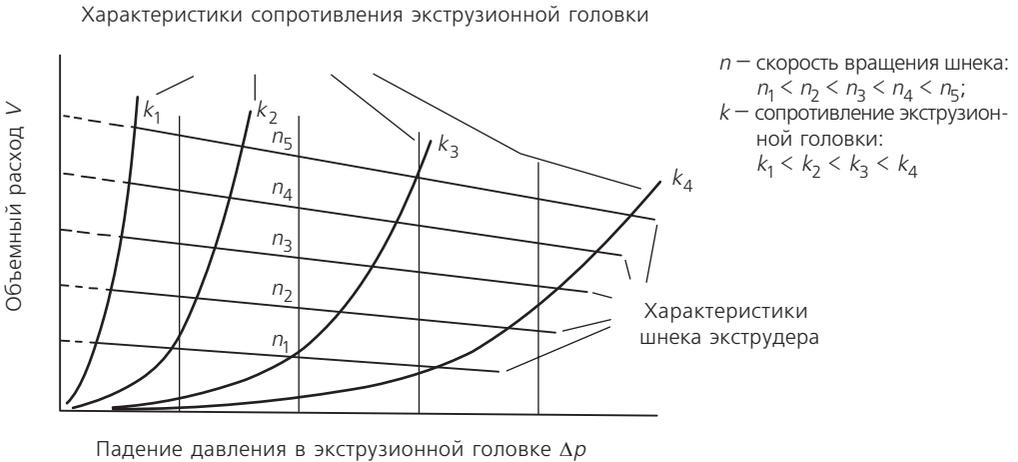


Рис. 1.3. Диаграмма производительности традиционного экструдера

При выборе конструкции экструзионной головки перепад давления в ней имеет первостепенное значение.

Приводимая ниже блок-схема процесса конструирования демонстрирует, каким образом перечисленные выше факторы должны учитываться в ходе разработки конструкции экструзионной головки (рис. 1.4). Исходные данные, необходимые для начала проектирования экструзионной головки (рис. 1.4, этап I), перечислены ниже:

- геометрия экструдированного изделия (например, труба, плоская пленка, профиль произвольной формы), а также соответствие требований к изделию свойствам перерабатываемого полимера;
- способ подачи расплава в экструзионную головку, определяющий ее тип (прямочная, угловая или офсетная), а также возможность одновременного производства нескольких изделий (многоручьевые головки) (рис. 1.5);
- свойства перерабатываемого материала или комбинации материалов (для соэкструзии);
- рабочий режим (или диапазон рабочих режимов) экструзионной головки. Под рабочим режимом понимается комбинация таких параметров, как пропускная способность экструзионной головки и температура расплава в ее канале.

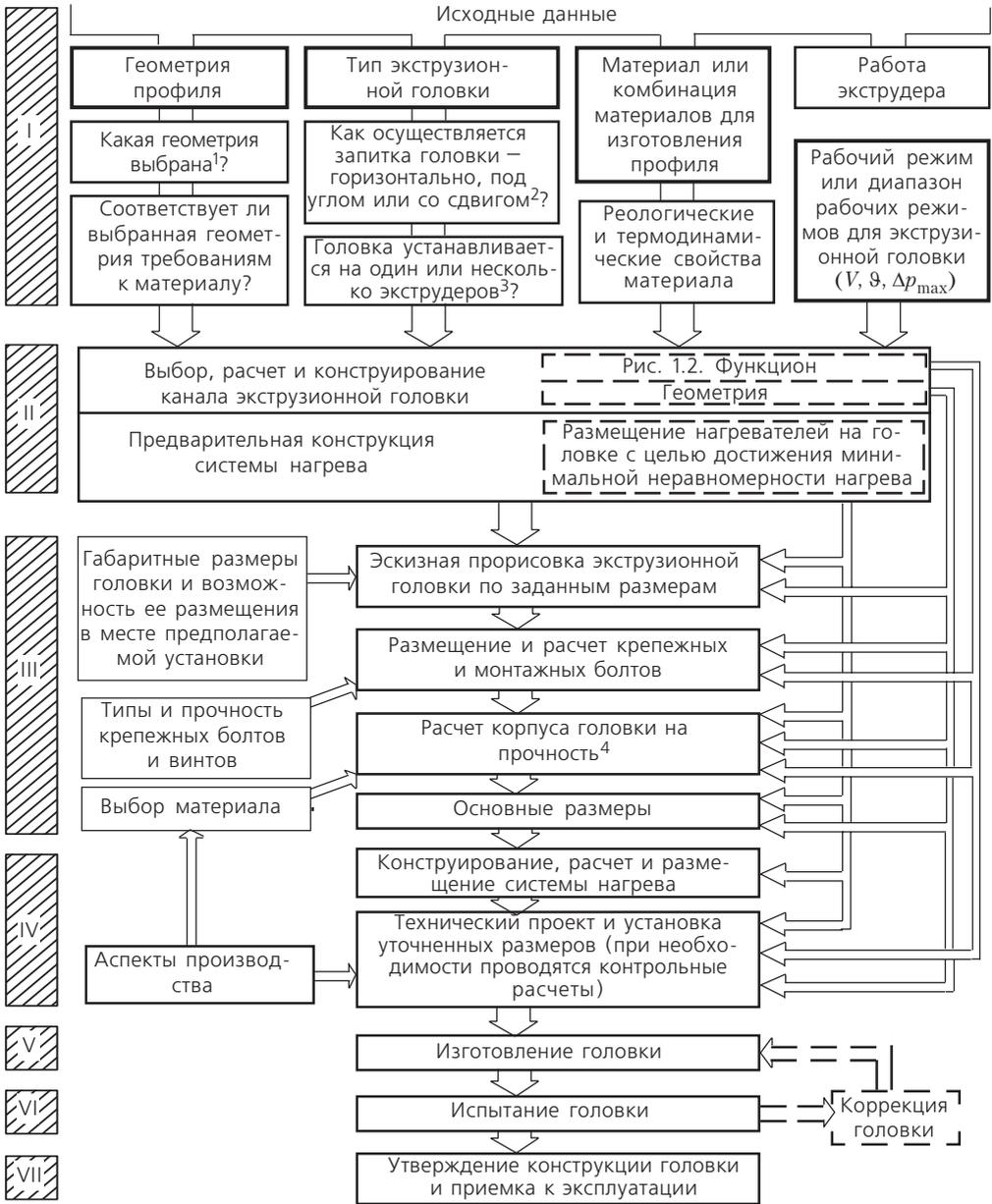


Рис. 1.4. Блок-схема процесса разработки конструкции экструзионной головки от эскизного проекта до утверждения окончательного варианта

¹ С учетом технологичности конструкции профиля по согласованию с заказчиком. – Примеч. науч. ред.

² См. выше типы головок. – Примеч. науч. ред.

³ При производстве комбинированных изделий соэкструзией. – Примеч. науч. ред.

⁴ И плотность стыков сопрягаемых деталей. – Примеч. науч. ред.