

Н. П. Молоканова

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Допущено Методическим советом Учебно-методического центра по профессиональному образованию Департамента образования города Москвы в качестве учебного пособия для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования

7661



МОСКВА
2008

УДК 658.5(075.32)
ББК 30.6я723
М75

Рецензенты:

старший научный сотрудник Государственного Научного Центра РФ физико-энергетического института имени А. И. Лейпунского *М. И. Захарова*;
зам. директора по учебной работе, преподаватель высшей квалификационной категории Обнинского политехнического техникума *А. В. Рыдкий*;
руководитель подразделения системы обеспечения и интеграции по профессиональному образованию Департамента образования города Москвы *О. А. Быковец*

Молоканова Н. П.

М75 Типовые технологии производства : учебное пособие / Н. П. Молоканова. — М. : ФОРУМ, 2008. — 272 с. : ил. — (Профессиональное образование).

ISBN 978-5-91134-228-9

Рассмотрены типовые технологии по процессам и по видам производства — деятельности. Представлены процессы гидромеханические, тепловые, массообменные и механические. Описаны технологии литья, обработки металлов давлением, порошковой металлургии и др. Изложены вспомогательные технологии электроснабжения, освещения, кондиционирования и вентиляции.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Пособие может быть использовано студентам родственных специальностей.

УДК 658.5(075.32)
ББК 30.6я723

ISBN 978-5-91134-228-9

© Н. П. Молоканова, 2008
© Издательство «ФОРУМ», 2008

Предисловие

Содержание предлагаемого учебного пособия соответствует программе учебной дисциплины «Типовые технологии производства», изучаемой студентами специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Основной задачей данного учебного пособия является ознакомление студентов с основными типами технологий, что необходимо для дальнейшего изучения и понимания специальных дисциплин «Автоматическое управление», «Автоматизация технологических процессов» и др.

В разделе 1 изложены основные понятия, рассмотрены основные виды и типы производства, классификация технологий. В разделе 2 рассмотрены технологии по самому процессу проведения: гидромеханические (перемещение жидкостей и газов, перемешивание и др.), тепловые (выпаривание, охлаждение и др.), массообменные (абсорбция, дистилляция, ректификация, экстракция, сушка и др.), механические (измельчение, смешивание и др.) процессы. В разделе 3 представлены основные методы проектирования и изготовления литых заготовок, обработка металлов давлением (прокатка, волочение, холодная штамповка и др.), технологические процессы изготовления изделий из металлических порошков и пластических масс, электрофизические, электрохимические и другие методы электроэрозионной обработки, основы технологии упрочняющей обработки и др. Раздел 4 посвящен вспомогательным технологиям электроснабжения, вентиляции, кондиционирования и др.

Подбор и изложение материала базируются на использовании опыта чтения лекций по данной дисциплине и практических знаниях.

Введение

Автоматизация производственных процессов имеет большое значение на современном этапе развития машиностроения и в других отраслях промышленности. Основой автоматизации производства являются технологические процессы (ТП), обеспечивающие высокую производительность, надежность, качество и эффективность изготовления изделий и протекания процессов. В связи с этим особое значение приобретают прогрессивные высокопроизводительные способы и методы изготовления, обработки и сборки, используемые при проектировании автоматизированных систем.

Повышению эффективности автоматизированной разработки ТП во многом способствует рациональное сочетание типовых и индивидуальных технологических решений на всех стадиях проектирования, а также высокий уровень стандартизации и унификации изделий, оборудования и самих ТП, позволяющих создавать и использовать соответствующие базы данных на основе информационных технологий.

Внедрение гибкой технологии (технологии переналаживаемого производства) с широким использованием компьютерной техники и переналаживаемых средств автоматизации позволяет быстро и эффективно проектировать ТП на изготовление новых изделий. Методы типовой и групповой технологий, позволяющие свести к минимуму индивидуальные разработки, широко используют при автоматизации технологических процессов и производств (ТПП).

Типизация ТП является одним из основных направлений технологической унификации наряду с методом групповой технологии. И типизация ТП, и метод групповой технологии являются основными направлениями унификации технологических решений, повышающих эффективность производства. Типовые технологии разрабатывают как для конкретных производственных условий, так и для перспективного развития производства, предусматривающие дальнейшее совершенствование производства с учетом развития науки и техники в области технологий.

Раздел 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТИПЫ И ВИДЫ ПРОИЗВОДСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

1.1. Основные понятия

Каждое производство имеет определенную организационную структуру своих подразделений, в каждом из которых и на производстве в целом происходят производственные процессы. Внутреннее содержание и функционирование каждого из этих процессов определяется их технологией или технологическим процессом.

Слово «технология» — «technelogos — мастерство, учение» это совокупность знаний о способах и средствах проведения производственных процессов, а также самые процессы (технологические процессы), при которых происходит качественное изменение обрабатываемого объекта. Другими словами, технология — это наука о способах и методах реализации производственных процессов различной физической природы.

Процесс рассматривается как последовательная смена явлений, состояний, стадий развития и т. д. или как совокупность последовательных действий для достижения какого-либо результата.

Структура любого процесса определяется техническими (технологическими и организационными) свойствами его элементов. Различают процессы: непрерывный, дискретный, производственный, технологический.

Процесс непрерывный — процесс, в котором значения параметров изменяются постоянно и монотонно.

Процесс дискретный — прерывистый процесс, состоящий из отдельных частей.

Процесс производственный — совокупность всех действий, осуществляемых для получения готовой продукции.

Процесс технологический — процесс, в ходе которого решаются задачи технологии, т. е. предусматривает преобразование исходного сырья, изделий и т. д. с целью получения готовой продукции.

1.2. Типы и виды производства

Различие в программе выпуска изделий привело к условному разделению производства на три типа: единичное, серийное и массовое.

Единичное производство — изготовление единичных не повторяющихся экземпляров продукции или с малым объемом выпуска, что аналогично признаку не повторяемости технологического цикла в данном производстве. Продукцией единичного производства являются изделия, не имеющие широкого применения (это опытные образцы машин, тяжелые прессы и т. д.).

Серийное производство — периодическое технологически непрерывное изготовление требуемого количества одинаковой продукции в течение продолжительного промежутка времени. Производство изделий осуществляется партиями. В зависимости от объема выпуска этот тип производства делят на мелко-, средне-, крупносерийное производство. Например, выпускаемые периодически повторяющимися партиями металлорежущие станки, насосы, редукторы и т. п.

Массовое производство — технологически и организационно непрерывное производство узкой номенклатуры изделий в больших объемах по неизменяемым чертежам в течение длительного времени, когда на большинстве рабочих мест выполняется одна и та же операция. Например, изготовление автомобилей, тракторов, электродвигателей и т. п.

Отнесение производства к тому или иному типу определяется не только объемом выпуска, но и особенностями самих изделий. Например, изготовление опытных образцов наручных часов в количестве нескольких тысяч штук в год будет представлять единичное производство. В то же время изготовление тепловозов

при объеме выпуска нескольких штук можно считать серийным производством.

Об условности деления производства на три типа говорит и то, что обычно на одном и том же заводе, а нередко в одном и том же цехе одни изделия изготавливаются единицами, другие — периодически повторяющимися партиями, третьи — непрерывно. Следовательно, на одном и том же заводе и даже в цехе могут быть совмещены три типа производства. Это во многом зависит от продолжительности операционного технологического процесса изготовления изделий. Поэтому отнесение производства завода или цеха к одному из типов обычно делается по преобладающему типу производства.

Для определения типа производства можно использовать коэффициент закрепления операций

$$K_{30} = n_{от} / M,$$

где $n_{от}$ — число различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению на участке или в цехе в течение месяца;

M — число рабочих мест участка или цеха.

В соответствии со стандартами рекомендуемые K_{30} :

- для единичного производства — свыше 40;
- для мелкосерийного производства — от 20 до 40 включительно;
- для среднесерийного производства — от 10 до 20 включительно;
- для крупносерийного производства — от 1 до 10 включительно;
- для массового производства — 1.

Например, если на производстве 20 единиц металлорежущего станка (оборудования), а количество операций различных технологических процессов, выполняемых на данном участке, — 60, то коэффициент закрепления операций $K_{30} = 60/20 = 3$, что означает крупносерийный тип производства.

Таким образом, тип производства с организационной точки зрения характеризуется средним числом операций, выполняемых на одном рабочем месте, а это, в свою очередь, определяет степень специализации и особенности используемого оборудования.

Ориентировочно тип производства можно определить в зависимости от объема выпуска и массы изготавливаемых изделий (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Ориентировочные данные для определения типа производства

Производство	Число тяжелых деталей одного типоразмера (массой более 100 кг) в год	Число средних деталей одного типоразмера (массой свыше 10 до 100 кг) в год	Число легких деталей одного типоразмера (массой до 10 кг) в год
Единичное	До 5	До 10	До 100
Мелкосерийное	От 5 до 100	От 10 до 200	От 100 до 500
Среднесерийное	От 100 до 300	От 200 до 500	От 500 до 5000
Крупносерийное	От 300 до 1000	От 500 до 5000	От 5000 до 50 000
Массовое	От 1000	От 5000	От 50 000

Производственные процессы делятся на два вида: поточный и непоточный.

Поточное производство характеризуется непрерывностью и равномерностью. В поточном производстве заготовка после завершения первой операции без задержки передается на вторую операцию, затем на третью и т. д., а изготовленная деталь сразу же поступает на сборку. Таким образом, изготовление деталей и сборка изделий находятся в постоянном движении, причем скорость этого движения подчинена такту выпуска в определенный промежуток времени.

Понятие «поточность производства» относится к процессу изготовления детали, изделия, продукции, а не к режиму работы технологического оборудования. При поточной организации производства максимально загруженным, т. е. наиболее непрерывно работающим, будет оборудование только лимитирующей по времени операции. Остальное оборудование из-за несинхронности этапов и стадий данного процесса может иметь разные коэффициенты загрузки.

Непоточное производство характеризуется неравномерным движением полуфабриката в процессе изготовления изделия, т. е. технологический процесс изготовления изделия прерывается вследствие различной продолжительности выполнения операций, а полуфабрикаты накапливаются у рабочих мест на складах. Сборку изделий начинают лишь при наличии на складах полных комплектов деталей. В непоточных производствах отсутствует

такт выпуска, а производственный процесс регулируется графиком, составленным с учетом плановых сроков и трудоемкости изготовления изделий.

Каждый вид производства имеет свою область использования, поточный вид производства встречается в массовом производстве, а непоточный вид организации производства присущ единичному и серийному производству.

Организационные принципы поточного вида производственных процессов используют зачастую в крупносерийном производстве при изготовлении изделий, имеющих конструктивно-технологическое подобие. Это определяет общность технологических процессов изготовления изделий, что позволяет изготавливать их поточными методами с переналадкой оборудования при переходе от изделия одного наименования к изделию другого наименования с отличным от предыдущего тактом выпуска. Таким образом, такт или скорость поточного производства могут быть не только постоянными, но и переменными, а также непрерывно изменяющимися по требуемому закону. Такой вид организации производственного процесса получил название **переменно-поточного**.

Каждое производство (предприятие) обладает определенной **производственной мощностью**, под которой понимается максимально возможный выпуск продукции установленной номенклатуры и количества, который может быть осуществлен за определенный период времени при установленном режиме работы. Различают действительную и проектную мощности.

Проектная мощность есть установленная в проекте строительства или реконструкции производства производственная мощность, которая должна быть достигнута при условии обеспечения производства принятыми в проекте средствами производства, кадрами и организацией производства.

Производственная мощность действующего производства (*действительная мощность*) не является постоянной и зависит от технического уровня работающих, уровня использования основных и оборотных фондов, сменности работы, уровня механизации и автоматизации производства и других факторов. Изготовление любых изделий занимает определенное время.

Для выполнения производственного процесса должны быть соответствующим образом оборудованы рабочие позиции (места). В машиностроительном производстве используют производственное оборудование, которое по характеру выполняемой работы делят на основное (технологическое) и вспомогательное.

К основному относят оборудование, непосредственно выполняющее операции технологического процесса. Вспомогательное оборудование не участвует непосредственно в технологическом процессе изготовления изделий, но выполняет обслуживание основного оборудования.

1.3. Классификация технологий

Технологии классифицируются по различным признакам.

Технологии по видам производства — деятельности подразделяются следующим образом:

- технологии машиностроения;
- экономики;
- организации производства:
 - 1) заготовительное производство (металлургия, прокат, термическая обработка и т. д.);
 - 2) технологии формообразования (резание, электроэрозионная и электрохимическая обработки);
 - 3) инструментальное производство;
 - 4) механосборочное производство;
 - 5) технологии получения неразъемных соединений;
 - 6) специальные виды технологий (технология взрыва, нанесения покрытий, нанотехнологии и т. д.);
 - 7) метрология;
 - 8) неразрушающие методы контроля и испытаний;
 - 9) автоматизация и компьютеризация технологических процессов;
 - 10) технологии в области энергетики (энергосберегающие и обеспечивающие технологии) и другие.

Технологии подразделяются по самому процессу проведения на:

- гидромеханические (перемещения, смешивания, центрифугирования, фильтрации, очистки жидкостей и газов);
- тепловые (нагревания, охлаждения, выпаривания, кристаллизации);
- массообменные (ректификации, адсорбции, абсорбции, сушки, экстракции);
- механические (перемещения твердых материалов, дозирования, измельчения).

Существуют следующие вспомогательные технологии:

- водо- и теплоснабжение;
- вентиляция;
- кондиционирование;
- очистка сточных вод, газовых выбросов и др.

Контрольные вопросы

1. Что такое процесс, технологический процесс, производственный процесс?
2. На какие типы условно подразделяется производство, и чем они отличаются друг от друга?
3. Что такое поточное и непоточное производство?
4. Какова взаимосвязь типов и видов производства?
5. Что такое производственная мощность, на какие виды она подразделяется?
6. Как и по каким признакам классифицируются технологии?

Раздел 2

ТЕХНОЛОГИИ ПО ПРОЦЕССУ ПРОВЕДЕНИЯ

2.1. Общие положения

Промышленное производство характеризуется разнообразием технологических процессов, которые представляют собой результат целенаправленной деятельности человека для получения определенных продуктов, предметов и материалов. Для осуществления технологических процессов применяют технические объекты, называемые аппаратами.

По общепринятой классификации, основанной на кинетической (скоростной) закономерности процессов, различают:

- *гидромеханические процессы*. Их скорость j_r определяется законами гидродинамики:

$$j_r = dV/Fd\tau = \Delta p/R_1 = K_1\Delta p,$$

где V — объем перемещаемой среды;

F — площадь сечения аппарата;

τ — время;

K_1 — коэффициент скорости процесса (величина, обратная гидравлическому сопротивлению R_1);

Δp — перепад давлений (движущая сила процесса).

К гидромеханическим процессам относятся процессы перемещения жидкостей и газов, осаждения, фильтрация, центрифугирования, псевдооживления (процесс, при котором частицы зернистого слоя движутся в потоке жидкости или газа, но не покидают пределов слоя), перемешивания в жидких средах и др.;

- *тепловые процессы*, скорость j_T которых определяется законами теплопередачи:

$$j_T = dQ/Fdt = \Delta t/R_2 = K_2\Delta t,$$

- где Q — количество переданной теплоты;
 F — поверхность теплообмена;
 K_2 — коэффициент теплопередачи (величина, обратная термическому сопротивлению R_2);
 Δt — разность температур между обменивающимися тепловой материалами (движущая сила процесса).
 К тепловым процессам относятся нагревание, охлаждение, кипение, конденсация, выпаривание и др.;
- *массообменные* (диффузионные процессы), их скорость j_m определяется скоростью перехода вещества из одной фазы в другую:

$$j_m = dM/Fdt = \Delta c/R_3 = K_3\Delta c,$$

- где M — количество вещества, перенесенного из одной фазы в другую;
 F — поверхность контакта фаз;
 K_3 — коэффициент массопередачи (величина, обратная диффузионному сопротивлению R_3);
 Δc — разность между равновесной и рабочей концентрациями вещества в фазах (движущая сила процесса).
 К массообменным процессам относятся процессы абсорбции, ректификации, экстракции, адсорбции, сушки, кристаллизации и др.;
- *механические процессы*, скорость которых определяется законами физики твердого тела.
 К механическим относятся процессы измельчения, классификации, дозирования, смешивания твердых материалов, их перемещения и др.;
- *химические процессы*, связанные с превращением веществ и изменением их химических свойств. Скорость j_x этих процессов определяется закономерностями химической кинетики:

$$j_x = dM/V_p dt = K_4 f(c),$$

где M — количество прореагировавшего в химическом процессе вещества;

V — объем реактора;
 K_4^p — коэффициент скорости химического процесса;
 $f(c)$ — движущая сила процесса, которая является функцией концентраций реагирующих веществ.

2.2. Гидромеханические процессы

2.2.1. Общие сведения

Гидромеханика — раздел механики сплошных сред, изучающий законы равновесия и движения жидкостей и газов, а также механического взаимодействия между жидкостью и твердыми телами (стенками), омываемыми ею. Жидкости и газы, в отличие от твердых тел, обладают свойствами текучести, т. е. даже очень малые силовые воздействия вызывают их деформацию.

Прикладная гидромеханика, или **гидравлика**, — техническая наука, представляющая собой механику жидкости, в которой широко используются обоснованные допущения и предположения, упрощающие рассмотрение процессов. В гидравлике широко используются экспериментальные данные, которые позволяют решать сравнительно сложные практические задачи механики жидкости.

С этой целью в гидромеханике вводится понятие *идеальной жидкости*, которая в отличие от *реальной (вязкой) жидкости* абсолютно несжимаема, т. е. не меняет плотность при изменении давления и температуры, а также не обладает внутренним трением между ее слоями (вязкостью).

Реальные жидкости делятся на *капельные (жидкости)* и *упругие (газы и пары)*, причем, если капельные практически несжимаемы и обладают малым коэффициентом объемного расширения, объем упругих жидкостей значительно изменяется под влиянием температуры и давления.

К основным физическим величинам, которые характеризуют свойства рассматриваемых сред, относятся:

- *плотность*, определяемая в случае однородного тела отношением ρ , кг/м³:

$$\rho = m/V,$$

где m — масса тела;
 V — его объем;

- *удельный вес*, определяемый для однородного тела γ , Н/м^3 :

$$\gamma = G/V,$$

где G — вес тела.

- Плотность и удельный вес капельных жидкостей значительно больше, чем соответствующие характеристики упругих жидкостей (газов);
- *давление*, определяемое выражением p , Н/м^2

$$p = P/F,$$

где P — сила, действующая на поверхность F перпендикулярно к ней.

Поскольку упругие жидкости обладают сжимаемостью, их плотность в значительной степени зависит от давления и температуры;

- *вязкость молекулярная (физическая)* — свойство реальной жидкости оказывать сопротивление движению в результате возникновения сил внутреннего трения.

При течении реальной жидкости скорость соседних слоев различается на некоторую величину. Таким образом, для перемещения одного слоя относительно другого необходимо приложить некоторую силу T , которая, отнесенная к поверхности перемещаемых слоев F , позволяет получить характерный для рассматриваемой жидкости параметр, называемый *напряжением внутреннего трения* τ ,

$$\tau = T/F.$$

Согласно закону Ньютона — Петрова

$$\tau = \mu \left| \frac{dw}{dn} \right|,$$

где dw/dn — градиент скорости, характеризующий изменение скорости по нормали между слоями. Коэффициент скорости μ , $\text{Па} \cdot \text{с}$, называется *динамической вязкостью* (иногда его называют коэффициентом вязкости, коэффициентом внутреннего трения).

Величину, равную отношению динамической вязкости к плотности среды, называют *кинематической вязкостью* ν , $\text{м}^2/\text{с}$:

$$\nu = \mu/\rho.$$

Вязкость капельных жидкостей снижается с увеличением температуры в отличие от вязкости газов, которая увеличивается с ее повышением;

- *поверхностное натяжение* (коэффициент поверхностного натяжения σ , Н/м) определяется как отношение силы P , действующей на участок контура поверхности жидкости, к длине l этого участка:

$$\sigma = P/l,$$

и определяет формирование поверхности на границе раздела: жидкость—газ (пар) или жидкость—жидкость (несмешиваемые друг с другом).

Гидростатика — раздел гидромеханики, в котором изучается состояние жидкостей, находящихся в относительном покое или условиях равновесия, когда частицы и слои, составляющие их, не перемещаются друг относительно друга. Поскольку при этом внутренние силы (трения) отсутствуют, а рассматриваются только внешние силы (тяжести, давления), жидкость близка к идеальной.

Давление жидкости P на единицу поверхности F называется *гидростатическим давлением* p , Н/м², и определяется соотношением

$$p = P/F.$$

Основные свойства гидростатического давления таковы:

- гидростатическое давление определяется весом столба жидкости высотой h над рассматриваемым участком:

$$p = h\rho g,$$

где g — ускорение свободного падения (на поверхности Земли $g = 9,81$ м/с²);

ρ — плотность, кг/м³;

- гидростатическое давление всегда направлено от жидкости к воспринимающей поверхности по перпендикуляру;
- величина гидростатического давления на одном уровне жидкости одинакова по всем направлениям.

Гидродинамика — раздел гидромеханики, в котором рассматриваются задачи, связанные с движением жидкости под действием приложенных к ней внешних сил — разности давлений, создаваемой с помощью нагнетательного оборудования (насосов

или компрессоров), либо вследствие разности уровней или плотностей жидкостей.

При рассмотрении течения жидкости по заполненному трубопроводу различают:

- *линейную скорость* w — путь, пройденный количеством жидкости в единицу времени;

Скорость отдельных слоев жидкости неодинакова, поэтому рассматривают среднюю скорость потока w , м/с:

$$w = V/F,$$

где V — объемный расход потока;

F — площадь поперечного сечения трубопровода;

- *объемный поток расхода* V , м³/с, определяется по формуле

$$V = wF,$$

где w — линейная скорость, м/с;

F — площадь поперечного сечения трубопровода;

- *массовую скорость* W , кг/(м² · с), определяемую как количество жидкости, перемещенное через единицу поперечного сечения в единицу времени,

$$W = G/F = w\rho,$$

где $G = V\rho$ — массовый расход жидкости.

Любая жидкость, находящаяся в состоянии относительного покоя или движения, обладает запасом энергии, равным сумме внутренней, потенциальной и кинетической энергии.

Внутренняя энергия U представляет собой суммарную энергию молекул жидкости, величина которой определяется многими параметрами, например, температурой, с увеличением которой она возрастает.

Потенциальная энергия является суммой потенциальной энергии давления pV и потенциальной энергии положения mgz . Последняя энергия определяется высотой центра тяжести рассматриваемого объема жидкости z над некоторой произвольно выбранной горизонтальной плоскостью (плоскостью сравнения).

Кинетическая энергия объема жидкости массой m , движущейся со скоростью w , определяется выражением $mw^2/2$.

В зависимости от характера движения различают ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости.

Ламинарный режим (от лат. *lamina* — пластинка, полоска) наблюдается при малых скоростях или вязкости жидкости. Характерной особенностью такого течения является движение слоев жидкости параллельными струйками, не смешивающимися друг с другом, причем скорость каждой из них постоянна и направлена вдоль общего течения.

При *турбулентном режиме* (от лат. *turbulentus* — бурный, беспорядочный) движение в жидкости носит хаотический характер, слои постоянно перемешиваются. Частицы перемещаются с различными скоростями по неопределенно искривленным траекториям, в то время как вся масса жидкости движется в одном направлении.

При движении реальной жидкости по трубопроводам происходит потеря напора или давления, обусловленная сопротивлением трения и местными сопротивлениями, возникающими при изменении направления или скорости потока (сужения, расширения, вентили, изгибы и т. п.).

Многие гидромеханические процессы связаны с движением капельных жидкостей или газов через неподвижные слои твердых материалов, состоящих из отдельных элементов. К основным характеристикам такого движения относятся: гидравлическое сопротивление слоя, порозность, или объемная доля пор в слое, истинная или фиктивная скорости потока, эквивалентный диаметр каналов, длина каналов.

Гидродинамика псевдооживленного слоя. При пропускании газа или жидкости через слой зернистого материала со скоростью $w_{\phi} < w_{кр1}$ (w_{ϕ} — фиктивная скорость потока, $w_{кр1}$ — первая критическая скорость или скорость начала псевдооживления) слой остается неподвижным, газ (жидкость) фильтруется через него, не нарушая общей структуры. Сопротивление слоя при этом возрастает пропорционально увеличению скорости потока.

При достижении скорости $w_{кр1}$ вес зернистого материала в слое уравновешивается силой потока с поверхностями частиц, которые переходят во взвешенное состояние и впоследствии приобретают возможность перемещения друг относительно друга. Слой в этом случае обладает свойствами, близкими к жидкости, приобретает текучесть, принимает форму аппарата, в котором находится, характеризуется вязкостью. При дальнейшем увеличении скорости газа (жидкости) слой расширяется, его порозность и интенсивность движения частиц увеличиваются. По-

скольку вес слоя при этом не изменяется, его сопротивление потоку остается неизменным.

При достижении $w_{\phi} = w_{кр2}$ ($w_{кр2}$ — вторая критическая скорость, или скорость уноса) начинается разрушение однородности слоя и унос из него частиц.

Аппараты с псевдооживленным слоем широко используют в промышленном производстве. Это объясняется такими свойствами слоя, как выравнивание полей температур и концентраций компонентов в объеме технологических аппаратов; максимальное развитие поверхности взаимодействия между оживляющим агентом и зернистыми материалами (поверхности фазового контакта); возможность транспортирования зернистых материалов в псевдооживленном состоянии; незначительное гидравлическое сопротивление слоя во всем диапазоне скоростей псевдооживления; простота конструктивного оформления технологических аппаратов с псевдооживленным слоем и возможность автоматизации их работы.

Псевдооживленному слою свойственны и некоторые недостатки: уменьшение движущей силы процесса, вызванное выравниванием концентрационных и температурных полей; возможность проскока значительных количеств газа без достаточного контакта с твердым материалом; возможность эрозионного изнашивания при трении твердых частиц о стенки аппаратов; возникновение электростатических зарядов при трении диэлектрических частиц друг о друга; необходимость дополнительной установки мощных газоочистительных устройств и т. д.

Контрольные вопросы

1. Что является предметом изучения гидромеханики?
2. Какими основными свойствами и параметрами характеризуется реальная жидкость?
3. Какие гидродинамические режимы течения вязкой жидкости различают?
4. Какова гидродинамика псевдооживленного слоя?

2.2.2. Перемещение жидкостей и газов

Для транспортирования жидких и газовых сред без контакта с окружающей средой между различными стадиями процессов внутри цехов, а также на значительные расстояния не только

внутри предприятий, но и между ними (до нескольких тысяч километров) используют трубопроводы, а также нагнетательное оборудование.

Трубопроводы. Материал, из которого изготавливают трубопроводы, определяется физико-химическими свойствами транспортируемых сред: нейтральные, кислые, щелочные, а также температурой и давлением. Способы соединения отдельных элементов трубопроводов между собой выбираются исходя из класса опасности сред: взрывоопасные, горючие, токсичные.

Для уменьшения агрессивного воздействия перекачиваемых веществ на внутреннюю поверхность металлических трубопроводов на нее могут наноситься защитные покрытия (лакокрасочные, полимерные и др.).

С целью снижения потерь теплоты через наружную поверхность трубопроводов на нее наносят внешнее изоляционное покрытие (асбест, войлок, стеклянную вату и др.). Иногда применяют трубы из неметаллических материалов (стекло, углеграфит, полимерные материалы).

В зависимости от конструкций различают разъемные и неразъемные соединения трубопроводов. Для обеспечения герметичности разъемных соединений в них используются прокладочные материалы (алюминий, медь, асбест, резины, фторопласт и др.), выбор которых определяется агрессивностью перекачиваемых сред, их температурой, а также рабочим давлением в трубопроводе. Для облегчения распознавания трубопроводов в производственных условиях используют их различную окраску.

Гидравлические машины. Движущей силой, обеспечивающей перемещение жидкостей, является перепад давлений, создаваемый специальными гидравлическими машинами. Их можно разделить на четыре группы:

- *динамические* (центробежные, осевые, вихревые и др.). В них механическая энергия вращающихся лопаток воздействует на незамкнутый объем жидкости, перемещаемый от входа в насос до выхода от него.

Центробежные насосы характеризуются тем, что всасывание и нагнетание жидкости происходит под действием центробежной силы, возникающей при вращении заключенного в кожухе рабочего колеса, снабженного лопатками. Центробежные насосы в зависимости от создаваемого напора подразделяются на насосы низкого, среднего и высокого давления.

Осевые насосы используются для перемещения больших количеств жидкости при низких давлениях;

- *объемные* (поршневые, пластинчатые, шестеренные, винтовые и др.). В них жидкость периодически всасывается и вытесняется из замкнутого объема твердыми телами.

Поршневые насосы применяют при относительно небольших подачах и высоких давлениях (до 100 МПа) для перекачивания высоковязких пожаро- и взрывоопасных жидкостей. Преимуществами поршневых насосов являются: возможность получения высоких напоров при малой подаче; незначительная зависимость подачи от напора; способность самовсасывания. К недостаткам можно отнести: меньшую, по сравнению с центробежными насосами, подачу; некоторую неравномерность подачи; большие габариты и сложность конструкции.

Пластинчатые насосы применяют для перемещения чистых жидкостей при умеренных подаче и напоре.

Шестеренные насосы применяют для перекачивания вязких жидкостей при невысоких подачах и высоких давлениях (до 15 МПа).

Винтовые насосы используют для перекачивания высоковязких жидкостей, топлива, нефтепродуктов и т. п. Подача этих насосов достигает 300 м³/ч, а напор — 20 МПа;

- *струйные* (эжекторы, инжекторы). В них движение потока жидкости создается струями газа (пара), воды;
- *пневматические* (эрлифты — устройства для подъема жидкости или гидросмеси под действием сжатого воздуха, газлифты, пневматические подъемники (монтежу) и др.). Движение жидкости в них создается давлением газа.

Основные параметры, характеризующие работу гидравлических машин таковы:

- *подача* — количество среды, перемещаемое машиной в единицу времени;
- *напор* характеризует удельную энергию, сообщаемую насосом единице веса перекачиваемой среды;
- *мощность*, потребляемая двигателем насоса.

Компрессорные машины. В технологических процессах различных отраслей промышленности осуществляется перемещение газа между соответствующими стадиями. В этих случаях, так же как для жидкостей, требуется создание перепада давлений, который могут создать компрессорные машины.

В зависимости от степени сжатия (отношение конечного давления, создаваемого компрессорной машиной, к начальному давлению, при котором происходит всасывание) различают следующие компрессорные машины:

- *вентиляторы*, предназначенные для перемещения больших объемов газа при относительно низких давлениях;
- *газодувки*, предназначенные для перемещения газов под высоким давлением;
- *вакуум-насосы*, предназначенные для отсасывания газов при давлениях ниже атмосферного.

Конструктивно выполняются поршневые, центробежные, осевые и струйные компрессорные машины.

Поскольку газы являются сжимаемыми средами, при перемещении изменяются не только их объем, но давление и температура.

Изменение состояния газа может происходить тремя способами:

- *изотермическое сжатие*, при котором температура обрабатываемой среды не меняется, а удельная работа по осуществлению этого процесса может быть определена;
- *адиабатический процесс*, при котором теплота, выделяющаяся при сжатии, расходуется на увеличение внутренней энергии;
- *политропический (действительный) процесс*, при котором происходит изменение температуры и увеличение внутренней энергии.

Поршневые компрессоры. По числу всасываний и нагнетаний поршневые насосы бывают — простого и двойного действия, по числу ступеней, в которых происходит сжатие газа, — одноступенчатые и многоступенчатые. По расположению поршня — горизонтальные, вертикальные и угловые.

Поршневой компрессор (рис. 2.1) устроен аналогично поршневому насосу.

Поршень 1 движется в охлажденном цилиндре 2, куда газ поступает с давлением p_1 через всасывающий клапан 3 и выходит сжатый под давлением p_2 через нагнетательный клапан 4. Таким образом, цикл работы поршневого компрессора включает стадии: расширение, всасывание, сжатие и выталкивание.

Поршневые машины используют также и в качестве вакуум-насосов. При этом устройства, откачивающие только газы, называются сухими, а откачивающие одновременно газ и жид-

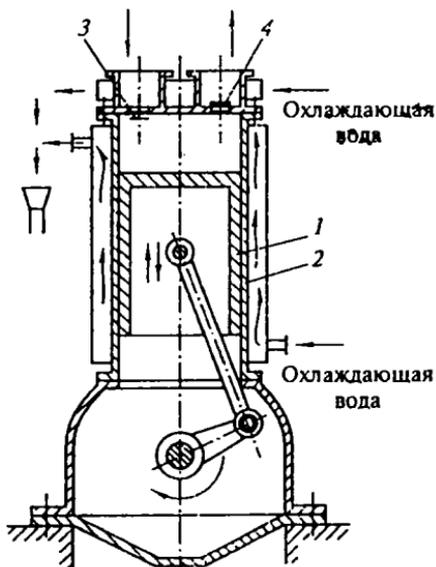


Рис. 2.1. Схема поршневого компрессора с одной ступенью сжатия: 1 — поршень; 2 — цилиндр; 3, 4 — всасывающий и нагнетательный клапаны

кость — мокрыми. Поршневые компрессоры имеют высокий КПД (0,85...0,90), могут создавать высокие давления, однако обладают низкой производительностью, подача газа неравномерна, они неприменимы при наличии в перекачиваемых средах абразивных включений.

Центробежные машины. В зависимости от создаваемого напора условно различают: вентиляторы (напор 1...3 кПа и реже до 10 кПа); турбогазодувки (напор 30...40 кПа, реже до 0,3 МПа), турбокомпрессоры (напор до 0,5 МПа, реже до 1,3 МПа).

Вентиляторы по устройству и принципу действия аналогичны центробежным насосам и состоят из кожуха, в котором вращается рабочее колесо с загнутыми лопатками. Под действием центробежной силы газ выбрасывается из межлопаточных каналов в спиральный кожух, а затем в напорный трубопровод. Поскольку газ имеет незначительную плотность, действующая на него центробежная сила мала и достигаемые значения напора невелики. Различают вентиляторы низкого и высокого давления. Вентиляторы надежны и просты в эксплуатации, могут перекачивать запыленные газы, при изготовлении из специальных материалов используются для транспортирования коррозионно-агрессивных газов.

В *турбогазодувках* благодаря их конструкции достигается дополнительное сжатие газа на каждой последующей ступени без изменения скорости вращения рабочих колес и их размеров.

Турбокомпрессоры по конструкции близки к турбогазодувкам, но по мере увеличения степени сжатия газа уменьшаются ширина и диаметр рабочих колес, которые к тому же часто размещают в нескольких корпусах. Кроме того, в связи со значительными степенями сжатия в таких конструкциях предусмотрен отвод теплоты при подаче воды в специальные каналы внутри корпуса либо в промежуточные холодильники между секциями.

Центробежные газовые машины нашли широкое применение в технике из-за компактности, простоты конструкций и возможности изготовления из различных коррозионно- и износостойчивых материалов, равномерной подачи газа при низких степенях сжатия и высокой производительности.

Осевые (пропеллерные) вентиляторы аналогичны осевым насосам. По сравнению с центробежными вентиляторами они имеют более высокий КПД, но более низкий напор, что позволяет использовать их для перемещения больших объемов газа по коммуникациям с низким гидравлическим сопротивлением.

Осевые компрессоры включают несколько ступеней, каждая из которых состоит из рабочего вращающегося и неподвижного венцов лопастей. Рабочие лопасти установлены на дисках или барабане ротора, неподвижные лопасти жестко закреплены в корпусе компрессора. Число ступеней составляет 10...20, поскольку степень сжатия не превышает 4, охлаждение газа не требуется.

В *струйных вакуум-насосах* для создания разрежения используют энергию рабочей жидкости (или пара) при непосредственном контакте между ними. Рабочая среда подается в вакуум-насос через патрубок, причем на выходе из сужающегося сопла она приобретает большую скорость и, согласно уравнению Бернулли, понижает давление, что способствует подсасыванию газа через патрубок в камеру смещения. Затем смесь через горловину поступает в диффузор (расширяющуюся трубу). Несмотря на низкий КПД (0,15...0,4) струйные вакуум-насосы применяют в различных производственных процессах из-за отсутствия движущихся частей, простоты устройства, возможности перекачивания агрессивных газов, использования в качестве смесителя (конденсатора).

Контрольные вопросы

1. Каково назначение трубопроводов?
2. По каким признакам классифицируются гидравлические машины?
3. Какими параметрами характеризуется работа гидравлических машин?
4. На чем основана классификация компрессорных машин?

2.2.3. Разделение жидких и газовых гетерогенных систем

Гетерогенные, или неоднородные, системы состоят из двух и более фаз, распределенных друг в друге. Фаза, находящаяся в раздробленном состоянии, называется *дисперсной*, или *внутренней*, *фазой*. Сплошная фаза, в которой распределены частицы дисперсной фазы, называется *дисперсионной*, или *внутренней*, *средой (фазой)*.

В зависимости от того, какая фаза является дисперсной, а какая дисперсионной, различают следующие гетерогенные системы (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Классификация гетерогенных систем

Дисперсная среда	Состояние дисперсной фазы	Наименование гетерогенной системы	Размер частиц дисперсной фазы, мкм
Газ	Твердое	Пыль	5...100
	Твердое	Дым	0,3...5,0
	Жидкое	Туман	0,3...3,0
Жидкость	Твердое	Суспензия:	
		грубая	>100
		тонкая	0,5...100
		муть	0,1...0,5
		коллоидный раствор	<0,1 (с возникновением броуновского движения)
	Жидкое	Эмульсия	<0,5
	Газообразное	Пена	—

Эмульсии и пены обладают при определенных концентрациях дисперсной фазы *инверсией* (обращением) фаз, заключающейся в переходе дисперсной фазы в дисперсионную среду, и наоборот.

В технологических процессах часто необходимо осуществлять разделение гетерогенных систем, методы и аппаратура для которых классифицируется в первую очередь по природе движущей силы процесса (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Классификация процессов и аппаратов для разделения гетерогенных систем

Движущая сила	Гетерогенная система	Процесс	Аппарат
Сила тяжести	Пыль	Осаждение	Пылеосадительная камера
	Суспензия	Отстаивание	Отстойник
	Эмульсия	Отстаивание	Отстойник
Разность давлений	Суспензия	Фильтрация	Фильтр жидкостной
	Пыль	Фильтрация	Фильтр газовый
Центробежная сила	Суспензия	Центрифугирование (отстойное или фильтрующее)	Центрифуга
	Пыль	Циклонный	Гидроциклон
	Эмульсия	Центрифугирование (отстойное)	Сепаратор
		Циклонный	Гидроциклон
Сила электрического поля	Дым	Осаждение	Электрофильтр сухой
	Туман	Осаждение	Электрофильтр мокрый

Кроме перечисленных в табл. 2.2 процессов, применяются и другие, например, промывание газов для дымов и туманов.

Выбор процесса и аппаратуры для разделения гетерогенных систем, как правило, определяется размерами дисперсной фазы, физическими свойствами разделяемых фаз, энергозатратами на его реализацию.

Кинетика отстаивания (разделение в поле сил тяжести). Отстаивание является одним из самых дешевых процессов и осуществляется в аппаратах, называемых отстойниками. Различают отстойники для разделения пылей, суспензий и эмульсий. Они могут быть периодического, полунепрерывного и непрерывного действия.

По функциональному назначению отстойники для разделения суспензий делят на стустители, осветлители и классификаторы. Для увеличения скорости осаждения мелкодисперсных частиц используют специальные растворы — коагулянты, способствующие объединению частиц между собой, что увеличивает массу осаждаемого агломерата.

Для разделения пылей применяются полочные пылеосадительные камеры, включающие расположенные друг над другом горизонтальные полки, равномерное распределение газа, вдоль которых осуществляется с помощью вертикальной перегородки. Для автоматизации разгрузки полки могут устанавливаться с наклоном, а на слой осадка может оказываться вибрационное воздействие и т. п.

Фильтрация (разделение суспензий в поле сил давления). Это процесс разделения суспензий и пылей с помощью пористых перегородок, задерживающих дисперсную — твердую — фазу и пропускающих дисперсионную среду (жидкость или газ). Фильтрация может осуществляться как с образованием осадка, так и с забивкой пор (отложение осадка внутри перегородки).

Движущая сила в процессе фильтрации суспензий может создаваться: гидравлическим давлением столба жидкости над перегородкой; использованием насосов для подачи суспензии в фильтр; энергией сжатого газа над суспензией или созданием вакуума под фильтрующей перегородкой. При этом процессы фильтрации могут осуществляться при постоянной разности давлений, при постоянной скорости и при переменных значениях разности давлений и скорости.

Аппараты для осуществления процессов фильтрации называются фильтрами. По способу организации процесса фильтры подразделяются на периодически действующие и непрерывно действующие. Фильтры по своей конструкции разнообразны, и их выбор зависит от свойств разделяемых систем, производительности, условий проведения процесса (давления, температуры и т. д.).

Наиболее распространенная конструкция для разделения пылей — это *рукавной фильтр* (рис. 2.2).

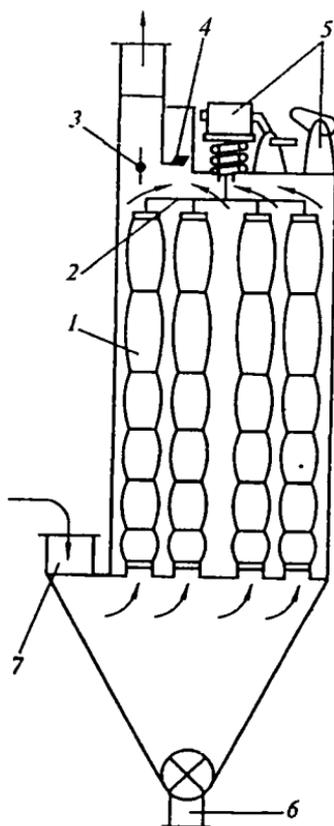


Рис. 2.2. Схема рукавного фильтра: 1 — фильтрующий элемент; 2 — рама; 3, 4 — заслонки; 5 — встряхивающий механизм; 6, 7 — патрубки

Он содержит фильтрующие элементы 1 в виде матерчатых рукавов, подвешенных к раме 2. Запыленный газ подается через патрубок 7 внутрь рукавов, в которых накапливается пыль. С помощью заслонки 3 регулируется расход удаляемого газа. Регенерация рукавов осуществляется встряхивающим механизмом 5, а также обратным током чистого газа, который подается при закрытой заслонке 3 через другую заслонку 4. Отделенная пыль сыпается в конический бункер и выгружается через специальный патрубок 6. Рукавные фильтры обеспечивают высокую степень разделения, но имеют значительное гидравлическое сопро-

тивление, а фильтрующая ткань чувствительна к высокой температуре и наличию паров химически агрессивных веществ.

Барабанный вакуум-фильтр и ленточный вакуум-фильтр относятся к фильтрам непрерывного действия с постоянным перепадом давления, первый предназначен для разделения суспензий, второй — для фильтрования агрессивных и неагрессивных быстро осаждающихся суспензий с различными размерами частиц твердой фазы. Ленточные фильтры имеют следующие преимущества: возможность реализации оптимальных технологических режимов фильтрования и промывки осадка; регулирования толщины слоя осадка и скорости движения фильтрующей ленты; простота обслуживания.

К фильтрам периодического действия относятся *вертикальный рамный фильтр-пресс и механизированный камерный фильтр-пресс*. Вертикальные рамные фильтры-прессы применяют для разделения трудно фильтрующихся суспензий. Работают они, как правило, при постоянной скорости, дешевы, компактны, обладают большой поверхностью фильтрования, приходящейся на единицу объема, хорошо приспособлены к изменяющимся свойствам суспензии. Цикл работы фильтра-пресса состоит из следующих операций: сборка; заполнение камер осадком (фильтрование); промывка осадка (отдувка); разборка и разгрузка фильтра. Механизированный камерный фильтр-пресс предназначен для фильтрования трудно фильтруемых суспензий с высокоэффективной промывкой. Цикл работы камерного фильтра-пресса аналогичен рамному фильтру-прессу, но сборка и разгрузка осадка выполняется специальными механическими устройствами. Механизированные фильтры-прессы имеют следующие преимущества по сравнению с рамными: полная механизация и автоматизация процесса, минимальные затраты времени на вспомогательные операции, высококачественная промывка осадка благодаря его горизонтальному расположению, осуществление процесса при оптимальной толщине слоя давления, возможность механического удаления осадка практически с любыми адгезионными свойствами, более высокая производительность и др.

Разделение в поле центробежных сил. Для разделения пыли, суспензии и эмульсии применяют два основных способа:

- центрифугирование (разделяемая смесь закручивается вместе с аппаратом, в который подается);

- циклонный процесс (разделяемая смесь закручивается в неподвижном аппарате).

Центрифугирование осуществляют в аппаратах, которые называются *центрифугами и сепараторами*. В центрифугах основной частью является цилиндрический барабан — ротор (с перфорированными или сплошными стенками), в сепараторах — набор (пакет) тарелок, вращающихся с высокой скоростью.

Промышленные центрифуги разделяют:

- по характеру протекания процесса (непрерывного и периодического действия);
- по способу выгрузки осадка из ротора (с ручной выгрузкой, контейнерной — кассетной, вибрационной, инерционной, гравитационной, — самовыгружающийся, выгрузкой ножом, пульсирующим поршнем и шнеком и др.);
- по расположению оси вращения ротора (вертикальные, горизонтальные и наклонные).

Маятниковые фильтрующие центрифуги периодического действия с нижней выгрузкой осадка применяют для получения осадка с низкой влажностью и обеспечения высокой эффективности его промывки, а также при разделении суспензий с абразивной или измельчающейся твердой фазой. Осадительные центрифуги этого типа в отличие от фильтрующих имеют сплошной ротор вместо перфорированного и применяются для получения осветленной жидкости высокой чистоты.

Горизонтальные фильтрующие ножевые центрифуги с автоматической выгрузкой осадка (рис. 2.3) предназначены для разделения суспензий со средне- и мелкозернистой (размер частиц более 30 мкм) твердой фазой. Осадительные центрифуги этого типа предназначены для разделения плохо фильтрующихся суспензий с нерастворимой твердой фазой (размер частиц 5...40 мкм).

Общим конструктивным признаком центрифуг является горизонтальное расположение оси ротора 7, вал 9 которого вращается в подшипниках качения 8, установленных в станине 10. Вращение вала 9 передается от электродвигателя 11. На передней крышке центрифуги смонтированы: привод механизма среза осадка 3 с ножом 5, разгрузочный бункер 1, питающая труба 2. В кожухе 6 центрифуги предусмотрен люк для доступа к ротору при замене или ремонте фильтрующих центрифуг и люк-воздушник 4 для отвода паров и газов из внутренней полости кожуха.

Фильтрующая центрифуга с пульсирующей выгрузкой осадка — одна из наиболее экономичных конструкций центрифуг непре-

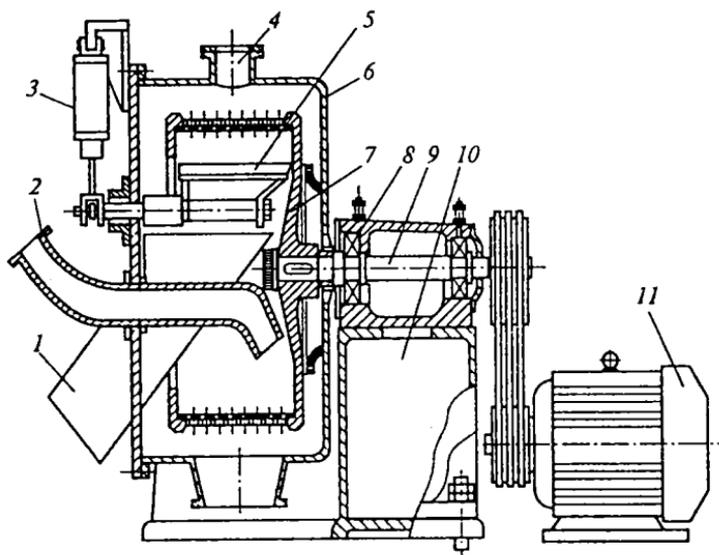


Рис. 2.3. Схема горизонтальной ножевой центрифуги с автоматизированной выгрузкой осадка: 1 — бункер; 2 — труба; 3 — привод механизма среза осадка; 4 — люк-воздушник; 5 — нож; 6 — кожух; 7 — ротор; 8 — подшипник качения; 9 — вал; 10 — станина; 11 — электродвигатель

рывного действия. Центрифуга приводится во вращение электродвигателем через клиноременную передачу. Внутри ротора, закрепленного на валу, расположен толкатель, который, вращаясь с ротором, одновременно воспринимает пульсацию от гидроцилиндра.

При работе центрифуги суспензия по питающей трубе и приемному конусу подается в ротор. Проходя конус, суспензия постепенно приобретает скорость, почти равную скорости вращающегося ротора. Из широкого конца конуса через проемы между опорными стойками днища ротора она выбрасывается на внутреннюю поверхность ротора. Фильтрат проходит через сито ротора и выводится из кожуха. Слой осадка, образовавшийся на поверхности сит ротора, при движении толкателя вперед перемещается на величину его хода. При обратном движении толкателя новая порция суспензии поступает на освободившийся участок сит, заполняя его осадком. Таким образом, толкатель, совершая пульсирующее движение, постепенно перемещает осадок вдоль ротора и производит выгрузку его небольшими порциями в приемник. По пути ко входу осадок может быть дополнитель-

но промывает. Основным недостатком этого типа центрифуг является забивка фильтрующего полотна и истирание его движением осадка.

К *суперцентрифугам* относятся трубчатые сверхцентрифуги и тарельчатые сепараторы. *Трубчатые центрифуги* предназначены для осветления суспензий, содержащих незначительное количество твердых высокодисперсных примесей, или для разделения стойких эмульсий. При разделении эмульсий центрифуги работают непрерывно, при разделении суспензий — периодически, так как необходимо регулярно выгружать накопившийся в роторе осадок. *Жидкостные тарельчатые сепараторы* являются отстойными сверхцентрифугами непрерывного действия с вертикальным ротором и предназначены для разделения эмульсий и мало концентрированных суспензий. Эмульсия подается в сепаратор по центральной трубе в нижнюю часть ротора, откуда через отверстия в тарелках распределяется между ними тонкими слоями. Тяжелая жидкость, перемещаясь вдоль поверхности тарелок, отбрасывается центробежной силой к периферии ротора и отводится через отверстия. Легкая жидкость перемещается к центру ротора и удаляется через кольцевой канал. Отверстия в тарелках располагаются по поверхности раздела между тяжелой и легкой жидкостями. Для того чтобы жидкость не отставала от вращающегося ротора, он снабжен ребрами.

Циклонные процессы осуществляют в циклонных аппаратах — инерционных пылеуловителях, в которых центробежные силы возникают вследствие тангенциального движения запыленного потока. Закручивание разделяемой системы и создание центробежного поля осуществляются в них с помощью неподвижных закручивающих устройств, установленных на входе в эти аппараты. Циклоны характеризуются простотой и компактностью конструкции, высокой производительностью и качеством разделения, низким гидравлическим сопротивлением. Для улавливания мелкой пыли (вплоть до 5...10 мкм) применяется батарейный циклон, который состоит из циклонов малого (100...250 мм) диаметра (циклонных элементов), работающих параллельно. Размещены они внутри общего кожуха, переходящего в общий бункер для сбора пыли из каждого элемента. Для разделения суспензий и эмульсий используются гидроциклоны.

Традиционный *цилиндроконический гидроциклон* представляет собой аппарат, состоящий из цилиндрической части с крышкой и конической части. В цилиндрической части установлен вход-

ной патрубком, по которому разделяемая смесь тангенциально подается в гидроциклон. Для вывода осветленной жидкости (легкой фазы) служит сливной патрубок. В вершине конуса гидроциклона расположена насадка для вывода тяжелой фазы. При тангенциальной подаче исходной смеси, как правило, образуются два основных вращающихся потока жидкости. В периферийной зоне жидкость движется вниз к вершине конуса. При этом часть ее выходит через насадку, основное же количество изменяет направление движения и, образуя внутренний восходящий поток, поднимается вверх, удаляясь из аппарата через сливной патрубок. При движении внешнего потока к вершине конуса из него выделяется часть жидкости, которая, перемещаясь в радиальном направлении, вливается во внутренний восходящий поток.

Гидроциклоны малых размеров (мультигидроциклоны) объединяют так же, как и газовые, — в батареи.

Разделение неоднородных смесей под действием электрического поля. Электроочистка применяется для выделения из газовых потоков мелких частиц, которые трудно осадить предыдущим методом. Принцип электроосаждения заключается в ионизации газового потока, содержащего твердые частицы или мелкие капли. Последние при этом приобретают отрицательный электрический заряд, перемещаются к положительно заряженному электроду и оседают на нем.

Ионизация газа может осуществляться самостоятельно (под действием высокой разницы потенциалов на электродах) и не самостоятельно (под воздействием излучений — радиоактивного, рентгеновского и др.). В технике газоочистки в настоящее время осуществляют только самостоятельную ионизацию.

Основными типами промышленных сухих (для отделения твердых частиц) и мокрых (для отделения капель) электрофильтров в зависимости от формы осадительного электрода являются трубчатые и пластинчатые.

Мокрая очистка газов. Она основана на прилипанию частиц к поверхности жидкости при движении загрязненного газа через аппарат. Основным требованием к аппаратам является создание максимально развитой поверхности контакта газа и жидкости. Различают полые, тарельчатые и насадочные газопромыватели (барботажные и пенные), аппараты ударно-инерционного действия (ротоклоны) и центробежного действия, скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури).

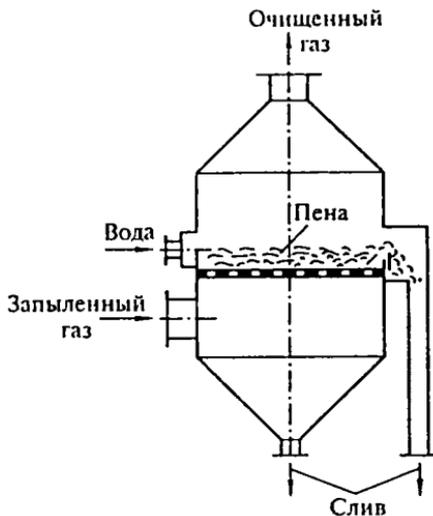


Рис. 2.4. Схема пенного газопромывателя

В *пенном газопромывателе* (рис. 2.4) запыленный газ проходит через перфорированную решетку, по которой протекает вода. При определенных скоростях газа она превращается в подвижную пену, таким образом значительно увеличивая поверхность контакта фаз и эффективность очистки.

Контрольные вопросы

1. Какие гетерогенные системы существуют?
2. Что называется внутренней фазой?
3. Каков физический смысл разделения в поле сил тяжести (отстаивание)?
4. Каков физический смысл процесса фильтрации?
5. Какие основные типы фильтров применяются в промышленности, и какие требования к ним предъявляются?
6. Какие существуют типы центрифуг?
7. Какие существуют типы мокрых пылеуловителей?

2.2.4. Перемешивание в жидких средах

Перемешивание представляет собой процесс многократного перемещения макрообъемов жидкости друг относительно друга за счет ввода внешней энергии в рабочую среду.

Перемешивание осуществляется в целях:

- обеспечения равномерного распределения твердых частиц в жидкости;
- дробления до заданной дисперсности и распределения в жидкости газа или другой жидкости;
- интенсификации тепловых и массообменных процессов.

Как правило, температура и концентрация в перемешиваемом объеме, постоянны во всех его точках.

Наиболее распространены следующие способы перемешивания:

- *механическое перемешивание* (при помощи мешалок с лопастями различных конструкций);
- *пневматическое (барботажное) перемешивание* (при помощи газа, пропускаемого через перемешиваемую среду, посредством барботера или другого распределительного устройства);
- *циркуляционное перемешивание* (путем многократного перекачивания перемешиваемых сред из исходной емкости насосом по замкнутому контуру (труба) и возврата его в емкость с помощью разбрызгивателя или эжектора).

Перечислим основные характеристики качества процесса перемешивания:

- *эффективность перемешивающего устройства*. Она выражается различными параметрами в зависимости от цели проведения этого процесса. При проведении перемешивания для получения суспензий и эмульсий она может характеризоваться равномерностью распределения фаз в полученной гетерогенной системе. В этом случае из разных точек объема приготовленной смеси отбираются пробы, производится их анализ на концентрацию дисперсной фазы и ее размеры с последующим сравнением полученных результатов. Эффективным перемешивающим устройством является то, у которого анализируемые параметры имеют наибольшее совпадение;
- *интенсивность перемешивания* определяет скорость достижения требуемого результата и характеризуется для каждого способа сочетанием определенных параметров. При механическом перемешивании интенсивность определяется как отношение вводимой в перемешиваемую среду энергии к ее объему. При пневматическом перемешивании интенсивность определяется количеством газа, пропускаемым в еди-

ницу времени через 1 м^2 свободной поверхности аппарата. Циркуляционное перемешивание характеризуется кратностью циркуляции, определяемой отношением объемной подачи насоса к объему перемешиваемой среды. Физический смысл данного параметра заключается в определении числа обновлений объема в аппарате в единицу времени. При механическом перемешивании важным параметром является мощность, необходимая для качественного осуществления этого процесса.

Различают следующие конструкции механических мешалок по устройству лопастей:

- *лопастные* (имеют несколько лопастей, установленных перпендикулярно оси вращения). При вращении мешалки на поверхности жидкости образуется центральная воронка, глубина которой увеличивается с возрастанием скорости вращения перемешивающего устройства. Существование воронки уменьшает объем перемешиваемой среды и разрушает создаваемые мешалкой вихри, снижая тем самым эффективность процесса. Для предотвращения образования воронки у стенок аппарата устанавливают 2...4 радиальных отражательных перегородки. Для повышения эффективности перемешивания на одном валу можно устанавливать несколько пар лопастей. Достоинства лопастных мешалок — простота устройства и дешевизна;
- *пропеллерные* (представляют собой устройства с несколькими фасонными лопастями типа судового винта). Создавая преимущественно осевые потоки перемешиваемой среды, пропеллерные мешалки сокращают общее время перемешивания. Пропеллерные мешалки применяются для интенсивного перемешивания жидкостей со средней вязкостью, приготовления суспензий и эмульсий;
- *турбинные* (имеют форму колес с лопатками открытого и закрытого типов). Работают они при высоких скоростях вращения и осуществляют интенсивное перемешивание жидкости. Достоинствами турбинных мешалок являются высокая эффективность перемешивания и растворения, в том числе вязких жидкостей, тонкое диспергирование твердых частиц;
- *специальные* (шнековые, ленточные и др.). Применяют для перемешивания вязких жидкостей, пастообразных материалов и систем с высокой концентрацией дисперсной фазы.

В ряде случаев при перемешивании вязких жидкостей используют интенсивные физико-механические воздействия на обрабатываемую среду (например, вибрации и пульсации в различных диапазонах частот).

Контрольные вопросы

1. Какие способы перемешивания существуют?
2. Что характеризует эффективность и интенсивность перемешивания?
3. Какие конструкции механических мешалок существуют?

2.3. Тепловые процессы

2.3.1. Основные сведения

Тепловые процессы или **теплообмен** — обобщенное название процессов передачи энергии в виде теплоты между телами, имеющими различную температуру.

Движущей силой теплообмена является разность температур.

Температурой называется физическая величина, характеризующая степень нагретости тела. Измерение температуры можно производить только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Применяемые для этого тела (вещества) называются *термометрическими*, а устанавливаемая с помощью шкалы температура — эмпирической. В качестве исходных значений, служащих при построении шкалы температуры для установления начала отсчета температуры и единицы ее измерения — градуса, применяется температура перехода химически чистых веществ из одного состояния в другое, например, температуры плавления льда $t_{пл}$ и кипения воды $t_{кип}$ при нормальном атмосферном давлении.

Эти величины в зависимости от типа шкалы имеют следующие значения:

- шкала Цельсия (стоградусовая шкала): $t_{пл} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кип} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- шкала Фаренгейта: $t_{пл} = 32\text{ }^{\circ}\text{F}$, $t_{кип} = 212\text{ }^{\circ}\text{F}$. Связь между температурами, выраженными в градусах Цельсия и Фаренгейта, имеет вид

$$t\text{ }^{\circ}\text{C}/100 = (t\text{ }^{\circ}\text{F} - 32)/180;$$

- шкала Кельвина: температура T отсчитывается от абсолютного нуля ($t = -273,15\text{ }^\circ\text{C}$) и называется абсолютной температурой. Связь между значениями температуры по шкале Кельвина (T, K) и шкале Цельсия ($t, \text{ }^\circ\text{C}$) имеет вид

$$T \text{ K} = t \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Из этого выражения видно, что шкалы Кельвина и Цельсия только смещены друг относительно друга.

Тепловые процессы, используемые в промышленности: нагревания, охлаждения, испарения и конденсации.

Вещества и тела, участвующие в процессе теплообмена, называются *теплоносителями*. Различают горячие, имеющие более высокую температуру и отдающие теплоту в процессе теплообмена и холодные, имеющие более низкую температуру и воспринимающие теплоту в процессе теплообмена теплоносители.

Передача теплоты может осуществляться как при непосредственном соприкосновении теплоносителей, так и через теплопроводящую стенку (поверхность теплообмена).

Различают стационарные (установившиеся) и нестационарные (неустановившиеся) теплообменные процессы.

Совокупность значений температур во всех точках объема (тела) называется *температурным полем*. *Изотермическая поверхность* в температурном поле — это поверхность, объединяющая точки с одинаковыми температурами. Из-за отсутствия разности температур теплота вдоль такой поверхности не распространяется. Распространяться в температурном поле она может только между изотермическими поверхностями.

При расчете тепловых балансов пользуются следующими характеристиками:

- *удельная теплоемкость* (c , Дж/(кг · К)) — количеством теплоты, необходимым для нагревания (охлаждения) 1 кг вещества на 1 К. Теплоемкости твердых и жидких веществ незначительно зависят от температуры, теплоемкости газов существенно увеличиваются с повышением температуры. Поэтому различают истинные теплоемкости при данной температуре и средние теплоемкости в некотором интервале температур.
- *удельная энтальпия* i , Дж/кг — количество теплоты, которое необходимо для нагревания 1 кг вещества от $0\text{ }^\circ\text{C}$ (энталь-

пия при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ условно принимается равной 0) до требуемой температуры t ;

- *удельная теплота фазовых превращений* — количество теплоты, которое выделяется (поглощается) при изменении агрегатного состояния 1 кг вещества (Дж/кг). При этом различают удельную теплоту преобразования (конденсации) r и удельную теплоту плавления (отвердевания) λ . Значения этих характеристик приведены в справочной литературе.

Теплота от одного тела к другому передается за счет теплопроводности, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность (кондукция) — перенос теплоты вследствие движения и колебаний микрочастиц, соприкасающихся друг с другом. Так передается теплота в твердых телах и тонких слоях жидкости и газа.

Теплопроводность описывается основным законом передачи теплоты — законом Фурье, указывающим, что количество теплоты, переданное вследствие теплопроводности, пропорционально градиенту температуры dt/dn , площади dF , через которую осуществляется передача теплоты, времени dt проведения процесса:

$$dQ = -\lambda dt/dndFd\tau.$$

Коэффициент теплопроводности λ показывает, какое количество теплоты проходит вследствие теплопроводности через 1 м^2 поверхности за 1 с при разности температур 1 К, приходящейся на 1 м длины нормали к изотермической поверхности. Он зависит, прежде всего, от природы и агрегатного состояния веществ, через которые осуществляется передача теплоты. В меньшей степени на теплопроводность газов влияют температура, давление и влажность.

Конвекция — перенос теплоты путем перемещения макрообъектов жидкости или газов. Перемещение возможно за счет разности плотностей, обусловленной неодинаковой температурой отдельных участков объема системы (естественная, или свободная, конвекция), а также путем принудительного их перемещения в результате внешних механических воздействий с помощью насосов, компрессоров воздуходувок и т. п. (вынужденная конвекция). Процесс передачи теплоты одновременно конвекцией и теплопроводностью называется **теплоотдачей**.

При теплоотдаче теплота передается от стенки через тонкий пограничный слой теплопроводностью, а затем в поток (ядро) жидкости конвекцией. Основным законом теплоотдачи является закон Ньютона, согласно которому количество теплоты $dQ_{\text{кон}}$, переданное конвекцией от поверхности к окружающей среде или наоборот, пропорционально поверхности теплообмена dF , разности температур поверхности $t_{\text{ст}}$ и окружающей среды t_f и времени $d\tau$ проведения процесса:

$$dQ_{\text{кон}} = \alpha(t_{\text{ст}} - t_f)dFd\tau.$$

Коэффициент теплоотдачи α показывает, какое количество теплоты передается от теплообменной поверхности 1 м^2 в окружающую среду или наоборот в течение 1 с при разности температур теплообменной поверхности и окружающей среды 1 К . Коэффициент теплоотдачи не является постоянной величиной для рассматриваемой среды и зависит, прежде всего, от гидродинамических условий течения жидкости вдоль теплопередающей поверхности, а также плотности, вязкости, удельной теплоемкости и других параметров теплоносителя.

Поскольку аналитическое определение значения коэффициента теплоотдачи α является достаточно сложной задачей, для этой цели прибегают к экспериментальным исследованиям с использованием теории подобия. Полученные в этом случае результаты могут быть с высокой степенью достоверности распространены на широкий диапазон подобных процессов. Анализ дифференциальных уравнений, описывающих процесс конвективного переноса теплоты с позиций теории подобия, позволил получить основные критерии теплового подобия.

Тепловое излучение (лучеиспускание) — перенос теплоты в виде электромагнитных волн, излучаемых твердым телом. Тепловое излучение характеризуется длинами волн, которые лежат в невидимой (инфракрасной) части спектра и имеют длину $0,8...40 \text{ мкм}$. При попадании на тела лучистая энергия частично поглощается $Q_{\text{погл}}$, частично отражается $Q_{\text{отр}}$, частично проходит сквозь них $Q_{\text{пр}}$:

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{пр}}.$$

Поглощаемая телом часть лучистой энергии переходит в тепловую, а отраженная и прошедшая сквозь него может погло-

щаться другими телами. Если рассматривать долю каждой энергии в общем количестве лучистой энергии, то в случае, если:

- $Q_{\text{погл}}/Q_{\text{л}} = 1$ (вся энергия поглощается), тело называется абсолютно черным;
- $Q_{\text{отр}}/Q_{\text{л}} = 1$ (вся энергия отражается), тело называется абсолютно белым;
- $Q_{\text{пр}}/Q_{\text{л}} = 1$ (вся энергия проходит сквозь тело), тело называется абсолютно прозрачным (или диатермичным).

Тела, имеющие все три доли, называют серыми телами.

Обычно эти механизмы распространения теплоты редко встречаются в чистом виде, они сопутствуют друг другу.

Теплопередача — процесс передачи теплоты от более нагретой среды к менее нагретой через стенку. Механизм теплопередачи складывается из трех стадий: конвекции от первой среды к плоской стенке; теплопроводности через плоскую стенку; конвекции от плоскости стенки ко второй среде. Если эти процессы описать уравнениями, то после их совместного решения можно получить коэффициент теплопередачи, который показывает, какое количество теплоты переходит в единицу времени от более нагретого к менее нагретому теплоносителю через разделяющую их стенку с площадью поверхности 1 м^2 при разности температур между теплоносителями один градус. Как следует из сказанного, движущей силой процесса теплопередачи является разность температур между горячим и холодным теплоносителями. Теплопередача при переменных температурах зависит от взаимного направления движения теплоносителей вдоль разделяющей их стенки. Наиболее распространенными видами движения являются прямоток и противоток. При прямотоке теплоносители движутся в одном направлении. Противоток характеризуется движением теплоносителя в противоположных направлениях. Однако применение противотока более экономично, чем прямотока, поскольку средняя разность температур при противотоке больше, чем при прямотоке, а расход теплоносителей одинаков при одинаковых начальных и конечных температурах теплоносителей. При расчете теплообменных аппаратов, а также аппаратов, работающих со средами, температура которых отличается от температуры окружающей среды, необходимо знать температуры на внешней и внутренней поверхностях стенок. Отдача теплоты от поверхности аппарата в окружающую среду происходит в общем случае путем конвекции и лучеиспускания. При расчете за-

даются температурой наружной поверхности аппарата, а затем проверяют ее.

Для уменьшения потерь теплоты аппараты покрывают слоем тепловой изоляции — материала с низкой теплопроводностью. При нанесении тепловой изоляции увеличивается тепловое сопротивление стенки и уменьшается температура наружной поверхности аппарата. Этим достигается снижение потерь теплоты, улучшаются условия труда обслуживающего персонала. При выборе толщины изоляции следует исходить из допустимых потерь теплоты, которые не должны превышать 3...5 % общей тепловой нагрузки, а также допустимой температуры стенки, которая на рабочих местах и в проходах во избежание ожогов, должна быть меньше 45 °С. Теплоизоляционные материалы и их коэффициенты теплопроводности (λ , Вт/(м · К)) приведены ниже.

Асбест.....	0,151
Войлок шерстяной.....	0,163
Изоляционный кирпич.....	0,116...0,209
Пенопласт.....	0,047
Стекланная вата.....	0,035...0,070
Шлаковая вата.....	0,076

Контрольные вопросы

1. Что является движущей силой тепловых процессов?
2. Какие механизмы передачи теплоты существуют?
3. В чем состоят различия между естественной и вынужденной конвекцией?
4. На чем основывается механизм передачи теплоты излучением?
5. Какие теплоизоляционные материалы применяются в промышленности?

2.3.2. Источники энергии и теплообменная аппаратура

Источники энергии. Источники энергии традиционно разделяют на топливные (уголь, нефть, природный газ, сланцы, битуминозные пески, торф, биомасса) и не топливные (гидроэнергия, энергия ветра, лучистая энергия Солнца, глубинная теплота Земли и др.); возобновляемые и не возобновляемые; первичные и вторичные.

Все возобновляемые источники энергии являются в той или иной мере производными от энергии Солнца и классифицированы по следующим критериям: солнечная энергия (прямая радиация); гидроэнергетические ресурсы (испарительно-конденсационный цикл); энергия ветра и волн; биомасса (растительного и животного происхождения).

К практически неисчерпаемым источникам энергии относят геотермальные и термоядерные. В геотермальные источники энергии входит глубинная теплота Земли, которая может быть использована как для теплоснабжения, так и для выработки электроэнергии.

К не возобновляемым источникам энергии относятся те, запасы которых по мере их добычи необратимо уменьшаются (уголь, нефть, сланцы и др.).

Все рассмотренные виды источников энергии относятся к первичным.

Вторичными источниками энергии являются отходы, побочные и промежуточные продукты, образующиеся в технологических агрегатах. Наибольшими тепловыми вторичными источниками энергии располагают предприятия химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов, газовой промышленности, тяжелого машиностроения и ряда других отраслей.

В зависимости от агрегатного состояния выделяют следующие виды топлива:

- твердое (бурый и каменный уголь, торф, сланцы, кокс, древесный уголь и др.);
- жидкое (нефть, газовый конденсат, бензин, керосин, смолы и др.);
- газообразное (природный газ, шахтный газ, коксовый, доменный и др.).

Основной технологической характеристикой топлива является *удельная теплота сгорания (теплотворность)* — теплота реакции горения топлива, т. е. количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива (кДж/кг) или 1 м³ газообразного топлива (кДж/м³) и при охлаждении продуктов горения до начальной температуры процесса.

Важными условиями развития промышленного производства являются повышение эффективности использования и экономия сырьевых и топливно-энергетических ресурсов.

Перечислим основные мероприятия, направленные на решение этих задач:

- рациональное и комплексное использование природных сырьевых ресурсов, сокращение их потребления путем замены химическими материалами (полимерами, синтетическими волокнами и т. д.);
- разработку и внедрение эффективного генерирующего и энергоиспользующего оборудования, технологических процессов, установок и машин, обеспечивающих высокий технический уровень производства при минимальных затратах сырьевых и энергетических ресурсов;
- создание систем централизованного теплоснабжения в результате строительства и использования атомных станций и крупных котельных, экономии энергии путем повышения качества тепловой изоляции;
- широкое использование современных средств автоматизации для учета, контроля и оптимизации расхода топлива, теплоты и электрической энергии в котельных установках, тепловых и электрических сетях;
- повышение уровня использования вторичных и топливно-энергетических ресурсов, максимальное применение рекуперации теплоты в технологических агрегатах, а также за счет утилизации других видов низкопотенциальной теплоты с помощью тепловых и абсорбированных холодильных машин;
- широкое использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной энергии, глубинной теплоты Земли, ветровой и приливной энергии, а также биомассы.

Основным рабочим процессом, реализуемым в теплообменной аппаратуре, является теплообмен между *теплоносителями*. При выборе теплоносителей руководствуются следующими требованиями: первоначальная температура теплоносителя должна быть достаточной для создания движущей силы в течение всего процесса теплообмена; он должен быть экономичен и безопасен при использовании, обеспечивать высокие коэффициенты теплоотдачи, не оказывать отрицательного воздействия на материал теплообменного аппарата.

Нагревание сред до необходимых температур в промышленности осуществляют с помощью *греющих теплоносителей*.

Водяной пар (особенно насыщенный) как греющий теплоноситель получил большое распространение в теплообменных аппаратах различных конструкций, поскольку его можно транспортировать по трубопроводам на большие расстояния, при его конденсации выделяется значительное количество теплоты, он доступен, дешев, нетоксичен и пожаробезопасен. В промышленности применяют нагрев острым водяным паром, когда пар вводится непосредственно в обогреваемую среду и смешивается с ней, и глухим, когда теплота передается через стенку — поверхность теплообмена.

Горячая вода (при нормальных давлениях) как греющий теплоноситель получила широкое распространение для нагрева сред до температур порядка 100 °С, особенно в отопительных и вентиляционных установках. Горячую воду можно транспортировать по трубопроводам на значительные расстояния, она обладает достаточно высокими коэффициентами теплоотдачи. Но нагревание горячей водой сопровождается снижением ее температуры вдоль поверхности теплообмена, что ухудшает равномерность обогрева и затрудняет регулирование температуры.

Топочные (дымовые) газы позволяют нагревать среды в интервале температур 180...1000 °С. Образуются они при сжигании твердого, жидкого или газообразного топлива в топках или печах различной конструкции. При этом методе нагревания трудно регулировать процесс теплопередачи и избежать локальных перегревов из-за неравномерности обогрева. Кроме того, обогрев топочными газами является пожароопасным, сопровождается необходимостью регулярной чистки аппаратов.

Высокотемпературные промежуточные теплоносители получают теплоту либо от топочных газов, либо от электрического тока и передают ее нагреваемому материалу.

Перегретая вода (выше 100 °С) существует при повышенных давлениях. Например, при температуре около 370 °С и давлении 22,5 МПа перегретая вода позволяет нагревать материалы до 350 °С. Но обогрев перегретой водой из-за высоких давлений значительно удорожает нагревательную установку.

Минеральные масла позволяют нагревать среды до температуры 300 °С. При нагреве используются: компрессорное, цилиндрическое масло и другие вещества с высокой температурой вспышки. Этот способ имеет недостаток: низкие коэффициенты теплоотдачи, пожароопасность и др.

Высокотемпературные органические теплоносители (ВОТ), применяемые как в жидком, так и в парообразном состоянии, позволяют осуществлять нагрев до температуры 400 °С. К этим теплоносителям относятся глицерин, нафталин, этиленгликоль, а также производные ароматических углеводородов (дифенил, эфир, дитомилметан и др.), кремнийорганические жидкости и т. п. Большинство ВОТ отличается термической стойкостью, взрывобезопасностью, значительными коэффициентами теплоотдачи и теплотворной способностью при нормальном давлении.

Расплавы солей (нитрит-нитратные смеси) предназначены для нагрева веществ до температуры 559 °С, этот процесс осуществляется при вынужденной циркуляции смеси. Так как эти смеси являются сильными окислителями, по соображениям взрывобезопасности недопустим их контакт с органическими веществами.

Расплавы металлов (литий, натрий, ртуть, свинец и др.) применяют для нагрева до температуры 800 °С. Сплав натрия и калия является весьма опасным горючим веществом. Ртуть применяется при атмосферном давлении для подачи теплоты только при пониженной температуре. Пары ее являются очень токсичными. В настоящее время жидкие металлы приобретают особое значение при их применении в качестве теплоносителей в реакторах атомных электростанций.

Твердые зернистые теплоносители позволяют нагревать различные технологические газы до температуры 1500 °С, в качестве зернистых теплоносителей применяют жаростойкие твердые материалы (кварц, диабаз, алунд, шамот и др.) с размером частиц 0,05...8 мм. Они имеют большую удельную поверхность, благодаря чему в сравнительно небольших аппаратах удастся разместить значительные теплообменные поверхности и осуществить эффективный теплообмен между заполняющими аппараты зернистыми материалами и продуваемыми через них газами.

Нагревание электрическим током характеризуется легкостью и точностью регулирования, равномерностью обогрева, компактностью нагревающих устройств. По способу превращения электрической энергии в тепловую различают электрические печи сопротивления (прямого и косвенного действия), индукционные и дуговые.

В *электрических печах сопротивления прямого действия* нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь и нагревается при прохождении через него электрического тока.

В *электрических печах сопротивления косвенного действия* теплота выделяется при прохождении электрического тока по нагревательным элементам. Выделяющаяся теплота передается материалу лучеиспусканием, конвекцией и теплопроводностью. Нагрев сред в таких печах осуществляется до температур 1000...1100 °С.

В *электрических индукционных печах* нагрев осуществляется вследствие тепловых эффектов, вызываемых индукционными токами, возникающими под воздействием переменного электрического тока либо в стенках аппарата, либо в самом нагреваемом веществе.

В *дуговых печах* нагреваемое тело взаимодействует непосредственно с электрической дугой, возникающей в газовой среде между электродами. Такой способ позволяет достигать температур 2500...3000 °С, однако он отличается неравномерностью нагрева и трудностью регулирования.

Охлаждение сред до температур 10...30 °С в промышленности осуществляют с помощью доступных и дешевых теплоносителей — *воды и воздуха*. Но температуры окружающих нас воды и воздуха весьма подвержены климатическим и сезонным колебаниям. Для экономии воды и охраны окружающей среды на предприятиях вводят систему водоснабжения, при которой практически отсутствует забор свежей и слив отработанной воды в водоемы.оборотная вода в дальнейшем подвергается обработке в теплообменных устройствах, позволяющих понизить ее температуру. Чаще всего для этих целей используют градирни — башни с насадкой (или полые), в которых осуществляется противоток воды и воздуха, причем основная часть теплоты отводится от жидкости путем ее частичного испарения. При использовании атмосферного воздуха как охлаждающего агента процесс теплопередачи осуществляют обычно при принудительной циркуляции воздуха, требующей дополнительных энергозатрат на вентиляционное оборудование. Для достижения температур, близких к 0 °С, производят охлаждение *льдом*. При этом лед вносится непосредственно в охлаждаемую жидкость и плавится в ней, отбирая теплоту плавления из взаимодействующей среды. Такой метод охлаждения применяется для жидкостей, которые не взаимодействуют с водой, и при этом допускается их разбавление. Для охлаждения до температур ниже 0 °С применяют холодильные растворы (растворы CaCl₂, NaCl и др.), обладающие температурой замерзания ниже этой величины.

Теплообменная аппаратура, применяемая в промышленности, разнообразна по своему функциональному назначению и по конструктивному исполнению. В теплообменных аппаратах могут происходить разнообразные процессы: нагревание, охлаждение, испарение, конденсация, кипение и др.

Основные требования, которым должны удовлетворять современные теплообменные аппараты, таковы:

- аппарат должен обеспечивать передачу требуемого количества теплоты от одной среды к другой с получением необходимых конечных температур и при возможно большей интенсивности теплообмена;
- при заданной тепловой нагрузке и других рабочих параметрах аппарат должен иметь малые габаритные размеры и низкую материалоемкость;
- аппарат должен работать стабильно при изменении в процессе теплообмена физических и химических свойств рабочей среды (вязкость, плотность и др.);
- поверхность теплообмена и другие элементы конструкции аппарата, омываемые рабочей средой, должны обладать высокой химической стойкостью;
- аппарат должен обладать запасом прочности, гарантирующим его безопасное состояние при напряжениях, возникающих в результате давления рабочей среды, и температурных деформациях;
- при заданных термодинамических параметрах рабочих сред (давление, температура, объем) аппарат должен быть работоспособным и надежным;
- при обработке загрязненной среды или среды, образующей отложения на стенках, в конструкции аппарата должна быть предусмотрена возможность периодической очистки поверхностей теплообмена.

По принципу действия теплообменные аппараты подразделяют на поверхностные (рекуперативные), регенеративные и смесительные.

Поверхностные теплообменные аппараты представляют собой теплообменные устройства, в которых теплоносители разделены стенками различной конфигурации, через которую передается тепловой поток. Наибольшее распространение получили *кожухотрубные* теплообменники. Они предназначены для работы с теплоносителями жидкость—жидкость, пар—жидкость, газ—жидкость, газ—газ. Это аппараты, выполненные в виде рядов труб,

собранных при помощи решеток в пучок и заключенных в кожух. Концы труб для обеспечения плотности их соединения с трубными решетками развальцовывают, припаивают или сваривают. Кроме этого, бывают теплообменники типа «труба в трубе», змеевиковый теплообменник, а также пластинчатые, блочные и шнековые теплообменники. В шнековых теплообменниках интенсивность теплообмена осуществляется путем непрерывного обновления поверхности нагреваемого или охлаждаемого материала (высоковязкие среды, суспензии, пасты и др.), которой он соприкасается со стенками аппарата. Обновление поверхности происходит в результате вращения винтообразных валов навстречу друг другу с одновременным перемешиванием и перемещением материала вдоль шнека. Эти устройства предназначены, прежде всего, для тепловой обработки высоковязких жидкостей и сыпучих материалов, обладающих низкой теплопроводностью. Шнековые теплообменники занимают мало места, высокоэффективны и могут быть приспособлены к различным производственным условиям путем объединения нескольких аппаратов в один агрегат. Однако они требуют большого количества затрат энергии.

Регенеративные теплообменные аппараты. В них передача теплоты от одного теплоносителя к другому происходит с помощью теплоаккумулирующей массы, называемой насадкой. Различают регенеративные теплообменники с неподвижной (насадка периодически оmyвается потоками горячего и холодного теплоносителей) и циркулирующей (в качестве насадки используется зернистый материал, который непрерывно перемещается сверху вниз через два регенератора) насадкой. Недостатками являются: необходимость установки пылеулавливающих устройств, герметизация охлаждаемого и нагреваемого газов, абразивное изнашивание трактов движения насадки.

Теплообменники смешения применяют в тех случаях, когда нет необходимости иметь чистые конденсаты и продукты нагрева для их последующего использования, они достаточно просты и дешевы. По конструкции различают: полые колонны, насадочные колонны, каскадные аппараты, струйные аппараты, пленочные подогреватели, пленочные аппараты. Конденсаторы смешения применяют для создания вакуума в различных аппаратах путем конденсации отсасываемых из них паров. Для отвода теплоты конденсации паров служит холодная вода, которая, смешиваясь с конденсатом, сливается в канализацию.

Контрольные вопросы

1. Какие источники энергии относятся к первичным и вторичным?
2. Какие основные мероприятия направлены на повышение эффективности использования и экономии сырьевых и топливно-энергетических ресурсов?
3. Какие горячие теплоносители могут быть использованы в процессах нагревания?
4. Какие теплоносители могут быть использованы в процессах охлаждения?
5. Какие требования предъявляются к современной теплообменной аппаратуре?
6. На какие типы делятся теплообменники по принципу действия?

2.3.3. Выпаривание растворов

Выпаривание — это процесс концентрирования твердых нелетучих веществ путем частичного удаления растворителя в виде пара. В технике процесс выпаривания получил широкое распространение, так как многие вещества (щелочи, соли, сахар и др.) получают в виде растворов (чаще всего водных), а для дальнейшего потребления, хранения и транспортирования концентрация их должна быть значительно повышена. Выпаривание применяют иногда для выделения растворителя в чистом виде, например, при опреснении морской воды, когда полученный пар конденсируется и используется в бытовых или технических целях. Насыщенный водяной пар, используемый в качестве горячего теплоносителя, называется греющим или первичным, а пар, образующийся в процессе кипения раствора, называется вторичным.

Основные свойства пара: концентрация, теплоемкость, температурная депрессия, теплота растворения (концентрирования).

Процесс выпаривания может осуществляться под вакуумом, при атмосферном и избыточном давлениях. При *выпаривании под вакуумом* снижается температура кипения раствора, что позволяет использовать для обогрева аппарата греющий газ низкого давления. Способ применим при выпаривании растворов, чувствительных к высокой температуре. *Выпаривание при атмосферном давлении* является наиболее простым, но наименее экономичным способом, поскольку вторичный пар обычно не используется и выбрасывается в атмосферу. *Выпаривание под избыточным давлением* вызывает повышение температуры кипения раствора, что позволяет использовать вторичный пар (экстрапар)

для других теплотехнических целей. Этот способ применим только для выпаривания термически стойких веществ и осуществим при использовании высокотемпературного греющего пара.

Различают также простое выпаривание, проводимое в однокорпусных выпарных установках, в которых греющий пар используется однократно. Простое выпаривание осуществляется на установках небольшой производительности, когда затраты теплоты не имеют большого значения. Для экономии греющего пара применяют *многократное выпаривание*, осуществляемое в многокорпусных установках, в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса используется в качестве греющего для последующего корпуса. В этом случае процесс выпаривания осуществляется в нескольких соединенных последовательно аппаратах, в которых поддерживается определенное давление. Многокорпусные установки могут быть прямоточными, противоточными и комбинированными. Преимуществом прямоточной схемы является возможность перемещения раствора из корпуса самотеком. Преимуществом противоточной схемы является более интенсивный теплообмен во всех корпусах, недостатком — необходимость использования в схеме насосов, работающих на горячих легко кристаллизирующихся потоках, что усложняет эксплуатацию установки. В комбинированных схемах осуществляются различные варианты ввода и перемещения раствора.

По принципу работы выпарные аппараты разделяются на *периодически действующие* (применяются для получения растворов высоких концентраций при небольших производительностях) и *непрерывно действующие* (имеют значительные производительности, более экономичны в тепловом отношении, легко автоматизируются и регулируются).

Выпарной аппарат должен отвечать ряду требований: быть простым, компактным, надежным в эксплуатации; иметь высокую производительность; допускать возможно большие напряжения поверхности нагрева и высокие коэффициенты теплопередачи при минимальном весе и стоимости.

Классификация их разнообразна, они подразделяются в зависимости от расположения и вида поверхности нагрева; конфигурации поверхности нагрева; компоновки поверхности нагрева; рода теплоносителя; взаимного расположения рабочих сред; кратности и режима циркуляции.

По методу выпаривания выпарные установки бывают: поверхностного типа (в них раствор контактирует с поверхностью тепло-

обмена); контактного типа (в них нагревание осуществляется без разделяющей поверхности теплообмена); адиабатного испарения.

В установках адиабатного испарения концентрирование растворов осуществляется путем испарения растворителя в рабочей камере, давление в которой ниже давления насыщения, соответствующего температуре поступающей в камеру жидкости. Различают одноступенчатые и многокорпусные адиабатные выпарные установки.

Наиболее распространенные в промышленности конструкции выпарных аппаратов таковы:

- с центральной циркуляционной трубой;
- с подвесной греющей камерой;
- с вынесенной греющей камерой;
- с вынесенной зоной кипения;
- с принудительной циркуляцией раствора;
- с поднимающейся пленкой;
- с нисходящей (падающей) пленкой;
- роторный прямоточный аппарат;
- барботажный;
- с погружными горелками.

Использование вторичного пара возможно не только в многокорпусных установках, но и в одном и том же выпарном аппарате. В этом случае вторичный пар подвергается дополнительно сжатию для повышения его энтальпии тепловым насосом и возвращается на обогрев того же самого аппарата. В качестве тепловых насосов для сжатия пара применяют турбокомпрессоры и пароструйные компрессоры — инжекторы. Экономическая целесообразность применения выпарных аппаратов с тепловым насосом определяется соотношением стоимости энергии, затрачиваемой на сжатие вторичного пара, и стоимости свежего греющего пара на данном предприятии. В одних случаях выпарной аппарат с тепловым насосом может оказаться экономичнее многокорпусной выпарной установки, в другом — наоборот.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса выпаривания?
2. Какие способы и методы выпаривания существуют?
3. По какому принципу классифицируют выпарные аппараты?
4. Каковы сущность и особенности многократного выпаривания?

2.3.4. Искусственное охлаждение

Для осуществления различных процессов (кристаллизации, разделения газов, сублимации, абсорбции, хранения пищевых продуктов) необходима низкая температура. Однако для охлаждения сред до температур ниже окружающей среды необходимо, в соответствии со вторым законом термодинамики, затратить определенную работу (энергию), которая реализуется в специальных установках. Техника производства холода при этом зависит от требуемой температуры охлаждения. По этому признаку различают: умеренное охлаждение (до 150 К) и глубокое охлаждение (ниже 150 К). Современная техника позволяет получать температуры, близкие к абсолютному нулю 0 К (-273°C).

В холодильных установках перенос теплоты от среды с низкой температурой к среде с высокой температурой осуществляется с помощью промежуточной среды, называемой холодильным агентом, или *хладагентом*.

Снижение температуры хладагента при проведении процессов искусственного охлаждения может осуществляться:

- испарением низкокипящих жидкостей;
- расширением предварительно сжатых газов.

При выборе хладагентов руководствуются следующими требованиями: они должны иметь высокую теплоту парообразования, т. е. поглощать при испарении большое количество теплоты; большую критическую температуру, обеспечивающую конденсацию паров хладагента естественными охлаждающими агентами (вода, воздух); небольшие удельные объемы паров; низкую температуру замерзания; безвредность для обслуживающего персонала; пожаробезопасность; коррозионную нейтральность; доступность и низкую стоимость.

В холодильных машинах, применяемых для получения умеренных температур, чаще применяют: аммиак, диоксид серы, диоксид углерода, хладоны (насыщенные фторуглероды, содержащие хлор, реже — бром).

В зависимости от принципа действия и вида затрачиваемой энергии различают:

- *парокомпрессионные машины*, в которых происходит циклическое испарение и конденсация хладагента после сжатия с помощью компрессора;

- *газокомпрессорные машины*, в которых происходит расширение предварительно сжатых в компрессоре газов, но отсутствует стадия их конденсации;
- *абсорбционные холодильные машины*, в которых используется способность вещества абсорбировать хладагент;
- *пароэжекторные холодильные машины*, в которых сжатие хладагента производится с помощью парового эжектора, а конденсация — смешением с водой.

Парокомпрессионные холодильные машины наиболее распространены и экономичны. В качестве хладагента в них используются аммиак (NH_3), диоксид серы (SO_2) или диоксид углерода (CO_2). Наименьшие энергетические затраты на получение искусственного холода достигаются в идеальной компрессионной машине, работающей по обратному циклу Карно. Принцип работы идеальной компрессионной машины заключается в следующем. Пары хладагента подаются в компрессор, где подвергаются сжатию при постоянном значении энтропии. В теплообменнике-конденсаторе происходит конденсация паров при постоянной температуре. Далее жидкий хладагент попадает в детандер, в котором происходит его расширение. Испарение хладагента осуществляется в теплообменнике-испарителе при постоянной температуре, после чего он возвращается в первоначальное состояние, с которого начиналось рассмотрение процесса. На практике вместо детандера в компрессионных машинах используют дроссельное устройство, работающее в изохорном режиме (дроссельный эффект Джоуля — Томпсона). Этот эффект заключается в снижении температуры реального газа (пара) при дросселировании на величину ΔT , пропорциональную перепаду давлений на входе и выходе из дроссельного устройства Δp . Компрессионные холодильные машины могут работать в режиме «влажного» (наиболее близкого к обратному циклу Карно и поэтому обладают наиболее высокой эффективностью) или «сухого» (в этом случае сжатию подвергается перегретый — сухой пар) хода компрессора.

Абсорбционные холодильные установки (рис. 2.5). В них в отличие от компрессионных используется не механическая работа компрессора, а сорбционные свойства взаимодействующих сред, процесс отгонки хладагента из растворителя с последующим проведением обратного процесса улавливания парообразного хладагента охлажденным растворителем. В установках такого типа чаще всего применяют систему аммиак (хладагент) — вода

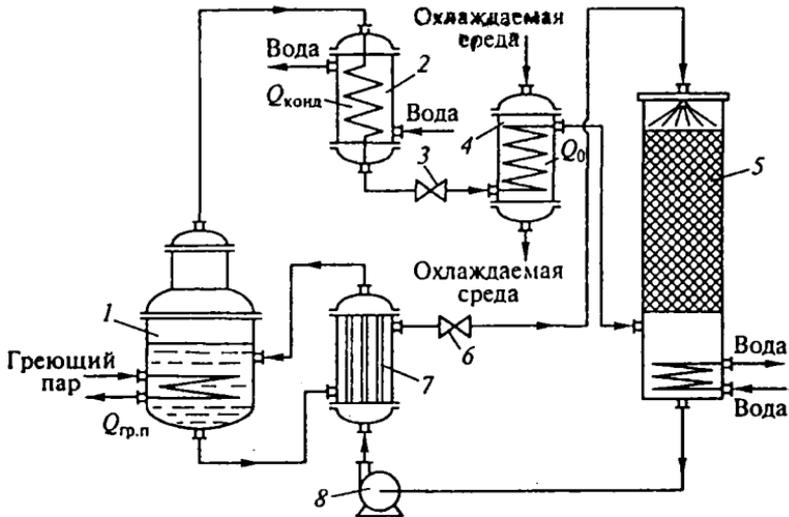


Рис. 2.5. Схема абсорбционной холодильной установки: 1 — кипятильник; 2 — теплообменник-конденсатор; 3 — дроссель; 4 — теплообменник-испаритель; 5 — абсорбер; 6 — вентиль; 7 — теплообменник; 8 — насос

(растворитель). Принцип работы такой установки заключается в следующем. Водоаммиачный раствор, содержащий около 50 % аммиака, поступает в кипятильник 1, работающий при повышенном давлении, чтобы пары аммиака могли конденсироваться в теплообменнике-конденсаторе 2 при нормальных условиях. Далее жидкий аммиак проходит через дроссель 3 и испаряется в теплообменнике-испарителе 4, отбирая теплоту от охлаждаемой среды. Затем пары аммиака направляются в абсорбер 5, где они поглощаются слабым водоаммиачным раствором, поступающим из кипятильника 1.

Для интенсификации процесса абсорбции перед подачей в абсорбер водный раствор аммиака охлаждается в теплообменнике 7 и дросселирующем вентиле 6. Хладагентом в теплообменнике 7 является обогащенная и охлажденная водоаммиачная смесь из абсорбера 5, подаваемая насосом в кипятильник 1, которая, в свою очередь, нагревается. Таким образом, в абсорбционной холодильной установке искусственный холод получается, прежде всего, за счет тепловой энергии, подаваемой в куб кипятильника 1.

Коэффициент полезного действия таких установок меньше, чем компрессионных, и они более громоздки. При этом в них

отсутствуют сложные механизмы, а в качестве источника энергии может использоваться дешевый утилизируемый пар любого сопутствующего производства.

Пароэжекторные холодильные установки (рис. 2.6) работают благодаря кинетической энергии расширяющегося потока газа или пара. Это позволяет использовать в них в качестве хладагента воду или захлажденные рассолы на ее основе.

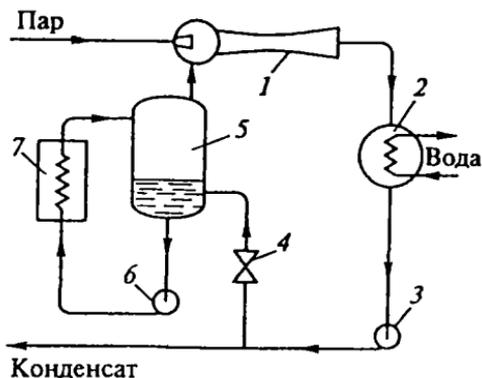


Рис. 2.6. Схема пароэжекторной холодильной установки: 1 — эжектор; 2 — конденсатор; 3, 6 — насосы; 4 — вентиль; 5 — испаритель; 7 — теплообменный аппарат

В этих установках рабочий пар под давлением 0,3...0,6 МПа направляется в сопло эжектора 1, где, расширяясь, он создает разрежение, благодаря которому «холодный» пар из испарителя 5 также поступает в эжектор 1. Смесь рабочего пара и «холодных» паров сжимается в эжекторе 1 и конденсируется в конденсаторе 2. Основная часть конденсата отводится из установки насосом 3, а часть, регулируемая вентилем 4, возвращается в испаритель 5 для сохранения материального баланса.

Производство холода осуществляется в теплообменном аппарате 7, через который насосом 6 подается вода. Часть ее испаряется в результате разрежения, созданного эжектором 1 в испарителе 5, что и приводит к охлаждению в нем воды. Достоинством таких машин является простота, взрывопожаробезопасность, экологичность, недостатком — трудность регулирования.

Глубокое охлаждение применяют в промышленности для разделения однородных газовых смесей на компоненты: кислород, азот, водород и др. При этом температура ожижения таких

газов ниже критической. Понижение давления в системах охлаждения неэффективно и создает значительные технические сложности. Поэтому основным направлением создания глубокого охлаждения является использование каскадных установок, в которых происходит постепенное понижение температур до требуемых. При этом применяют следующие методы:

- дросселирование — понижение температуры газа без совершения внешней работы путем уменьшения давления (цикл Линде);
- расширение газов с совершением внешней работы в детандере (цикл Капица).

Критерий выбора того или иного способа получения глубокого охлаждения сред определяется энергетическими показателями, которые можно осуществить, учитывая конкретные свойства сжижаемых газов. Так, при расширении в области между сравнительно высокими давлениями эффективным является процесс дросселирования, а если перепад давлений велик или расширение начинается при сравнительно высоких температурах, предпочтительнее будет детандирование. Для повышения холодопроизводительности комбинируют методы расширения газа в детандере и его дросселирования.

Контрольные вопросы

1. Какие виды хладагентов используются при осуществлении процесса умеренного охлаждения?
2. Какие машины могут применяться для охлаждения?
3. Каковы принципы и особенности эксплуатации абсорбционных холодильных установок?
4. В чем заключается принцип работы пароэжекторных холодильных установок?

2.4. Массообменные процессы

2.4.1. Общие вопросы массопередачи

Массообменные (диффузионные) процессы — технологические процессы, скорость которых определяется скоростью переноса вещества из одной фазы в другую. Движущей силой массообмен-

ных процессов является разность концентраций. К массообменным процессам относятся:

- *абсорбция* — процесс избирательного поглощения компонентов из газовых или парогазовых смесей жидкими поглотителями (абсорбентами);
- *ректификация* — процесс разделения однородных жидких смесей, не находящихся в термодинамическом равновесии, на компоненты в зависимости от их летучести при противоточном взаимодействии жидкости и пара;
- *экстракция (жидкостная)* — процесс извлечения вещества, растворенного в одной жидкости, другой жидкостью, не растворимой и не смешивающейся с первой;
- *экстрагирование* — процесс извлечения компонента из твердого вещества с помощью растворителя;
- *адсорбция* — процесс избирательного поглощения компонентов из газов, паров или растворенных в жидкостях веществ твердыми поглотителями (адсорбентами). Разновидностью адсорбции является *ионный обмен* — процесс извлечения вещества из раствора, основанный на способности некоторых твердых веществ (ионитов) обменивать свои подвижные ионы на ионы извлекаемого вещества;
- *сушка* процесс удаления влаги из твердых влажных материалов путем ее испарения и отвода образовавшихся паров;
- *кристаллизация* — процесс выделения компонента из растворов или расплавов в виде твердой фазы (кристаллов);
- *растворение* — процесс перехода твердой фазы в жидкую (растворитель);
- *мембранное разделение* — процесс разделения находящихся в однородных растворах веществ, основанный на способности некоторых тонких пленок (мембран) пропускать одни вещества и задерживать другие.

Вышеперечисленные процессы характеризуются переходом вещества из одной фазы в другую и называются *массопередачей*. В массообменных процессах участвуют как минимум три вещества. Два из них (распределяющие вещества, или фазы) обмениваются между собой содержащуюся в них третью (распределяемое вещество). Распределяющие вещества не участвуют в процессе массопередачи, а являются носителями распределяемого вещества, и их количество в процессе взаимодействия не изменяется. Различают два основных способа взаимодействия распределяющих фаз в процессе массообмена: противоток и прямоток. Ско-

рость массопередачи связана с механизмом переноса распределяемого вещества в фазах, между которыми происходит массообмен. Перенос вещества в фазах может происходить либо путем молекулярной диффузии, либо конвекцией и молекулярной диффузией одновременно (конвективная диффузия). Массопередача *молекулярной диффузией* осуществляется в неподвижной среде вследствие движения молекул, атомов и ионов. Массопередача *конвективной диффузией* реализуется в движущейся среде, при этом если движение жидкости обусловлено градиентами температуры или концентрацией, то такая конвекция называется свободной, или естественной. Если движение вызвано внешними силами, конвекция является вынужденной. В случае турбулентного движения жидкости, сопровождающегося массопередачей, в ряде случаев рассматривают турбулентный механизм переноса вещества, при котором оно переносится беспорядочными турбулентными пульсациями потока, такой механизм называется *турбулентной диффузией*.

Массопередача в системах с твердой фазой (сушка, адсорбция, экстрагирование и т. п.) представляет собой более сложный процесс. В нем, кроме массоотдачи от поверхности раздела фазы в поток жидкости (газа, пара), имеет место перемещение вещества в твердой фазе *массопроводностью*.

Контрольные вопросы

1. Какие технологические процессы называются массообменными?
2. Какие процессы относятся к массообменным?
3. Каким образом происходит перенос вещества между фазами в процессе массоотдачи?

2.4.2. Абсорбция

Абсорбция — процесс избирательного поглощения компонентов из газовых или парогазовых смесей жидкими поглотителями, называемыми абсорберами.

Принцип абсорбции основывается на различной растворимости компонентов газовых и парогазовых смесей в жидкостях при одних и тех же условиях. Поэтому выбор абсорбентов осу-

ществляют в зависимости от растворимости в них поглощаемых компонентов, которая определяется:

- физическими и химическими свойствами газовой и жидкой фаз;
- температурой и давлением осуществления процесса;
- содержанием газа в смеси.

При выборе абсорбента необходимо учитывать такие его свойства, как селективность (избирательность) по отношению к поглощаемому компоненту, токсичность, пожароопасность, стоимость, доступность и др.

Различают физическую абсорбцию и химическую абсорбцию (хемосорбцию). При физической абсорбции поглощаемый компонент образует с абсорбентом только физические связи. Процесс этот в большинстве случаев является обратимым. На этом свойстве основано выделение поглощенного компонента из раствора — *десорбция*. Если поглощаемый компонент вступает в реакцию с абсорбентом и образует химическое соединение, то процесс называют *хемосорбцией*.

Процесс абсорбции обычно является *экзотермическим*, т. е. сопровождается выделением теплоты.

Абсорбция широко используется в промышленности для разделения углеродовых газов на нефтеперерабатывающих установках, получения соляной и серной кислот, аммиачной воды, очистки газовых выбросов от вредных примесей, выделения ценных компонентов из газов крекинга или пиролиза метана, из газов коксовых печей и т. д.

Равновесие в системе газ (пар) — жидкость может характеризоваться тремя параметрами, например, температурой, давлением и составом одной из фаз. Установлено, что к параметрам, улучшающим условия абсорбции, относятся повышенное давление и пониженная температура, а к факторам, способствующим десорбции, — пониженное давление, повышенная температура и введение в абсорбер добавок, уменьшающих растворимость газов в жидкостях.

Материальный баланс процесса абсорбции выражается дифференциальным уравнением, из которого можно определить необходимый общий расход абсорбера. Процесс абсорбции характеризуется также *степенью извлечения (поглощения)*, представляющей отношение количества фактически поглощенного компонента к количеству, поглощаемому при полном его извлечении.

Кинетика процесса абсорбции состоит из трех основных стадий. Первая стадия — перенос молекул абсорбируемого компонента из ядра потока газа (пара) к поверхности раздела фаз (поверхности жидкости). Вторая стадия — диффундирование молекул абсорбируемого компонента через поверхностный слой жидкости (граница раздела фаз). Третья стадия — переход молекул абсорбируемого вещества от поверхности раздела фаз в основную массу жидкости.

При проведении процесса абсорбции, сопровождаемого химической реакцией (хемосорбция), протекающей в жидкой фазе, часть распределяемого компонента переходит в химически связанное состояние. В результате этого концентрация растворенного (физически связанного) распределяемого компонента в жидкости уменьшается, что приводит к увеличению движущей силы процесса по сравнению с чисто физической абсорбцией.

Скорость хемосорбции зависит как от скорости массопередачи, так и от скорости химической реакции. В этом случае различают диффузионную и кинетическую области протекания хемосорбции. В диффузионной области скорость процесса определяется скоростью массопередачи, в кинетической — скоростью химической реакции. В тех случаях, когда скорости массопередачи и реакции соизмеримы, процессы хемосорбции протекают в смешанной, или диффузионно-кинетической, области.

В технологических процессах наиболее широко используются непрерывные процессы абсорбции. При прямоточной схеме взаимодействия газа (пара) и жидкости их потоки движутся параллельно друг другу, а при противоточной — в противоположных направлениях. Сопоставление условий проведения прямоточного и противоточного процессов абсорбции показывает, что противоточный процесс позволяет обеспечить более высокую конечную концентрацию поглощаемого вещества в абсорбенте и меньший расход абсорбента, но средняя движущая сила процесса при этом меньше, а следовательно, противоточные аппараты требуют большую поверхность контакта фаз, что часто связано с увеличением общих размеров самих аппаратов.

Схемы с рециркуляцией предусматривают частичный возврат в массообменный аппарат либо жидкости, либо газа. При этом рециркуляцию жидкости осуществляют в том случае, если лимитирующей стадией процесса является переход вещества от поверхности раздела фаз в жидкость, а рециркуляцию газа — когда

лимитирующей стадией является переход вещества из газовой фазы к поверхности раздела фаз.

Десорбция — процесс выделения поглощенного газа из абсорбента, который производят с целью регенерации поглотителя для его повторного использования либо получения ранее поглощенного компонента в чистом виде. Десорбция может осуществляться:

- отгонкой в токе инертного газа и водяного пара, который приводят в соприкосновение с раствором после проведения процесса абсорбции. Вместо инертного газа может использоваться воздух, в который выделяется поглощенный компонент. Поскольку последующее разделение инертного газа и компонента затруднительно, данный метод применяют в тех случаях, когда извлеченный из абсорбента компонент в дальнейшем не используется. Водяной пар как десорбирующий агент применяют для извлечения нерастворимых в воде газов. При этом смесь десорбированного газа и водяного пара из десорбера направляют в конденсатор, в котором происходит отделение газа от водяного пара путем конденсации последнего. Если же температура кипения десорбируемого компонента высока, то его конденсируют совместно с водяным паром и затем отделяют от воды отстаиванием;
- нагреванием абсорбента, которое приводит к смещению равновесия в сторону десорбции и испарению десорбируемого компонента. Поскольку вместе с извлекаемым компонентом частично испаряется сам абсорбент, в дальнейшем требуется дополнительное разделение образующейся смеси;
- снижением давления над абсорбентом до атмосферного, если абсорбция проводилась при избыточном давлении, и вакуумированием с отсасыванием выделившегося компонента, если абсорбция проводилась при атмосферном давлении.

В ряде случаев для более полной регенерации абсорбента два последних способа объединяют вместе, а также применяют процесс ректификации.

Абсорбционные аппараты в зависимости от форм контакта газа (пара) и жидкости подразделяют следующим образом:

- *поверхностные абсорберы* используют для поглощения хорошо растворимых газов и их компонентов с выделением большого количества теплоты, поскольку эти аппараты снабжены высокоэффективной системой ее отвода. Данные аппараты применяются при невысоких нагрузках по газу,

так как поверхность массопередачи у них недостаточно развита. К аппаратам такого типа относятся оросительный (рис. 2.7) и пластинчатый абсорберы.

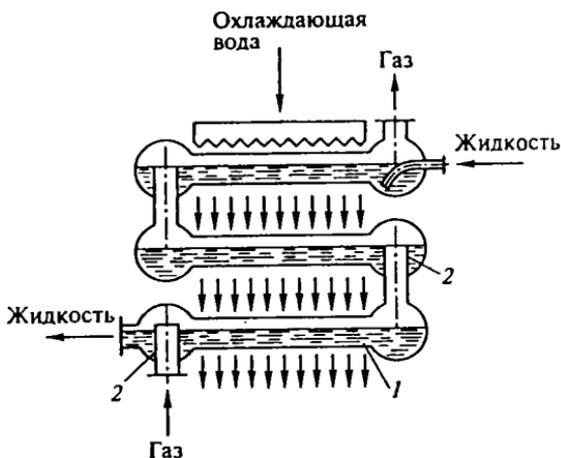


Рис. 2.7. Схема оросительного поверхностного абсорбера:
1 — труба; 2 — сливной порог

Оросительный абсорбер состоит из нескольких рядов горизонтальных труб 1, орошаемых снаружи водой. Необходимый уровень жидкости (абсорбента) в каждом элементе поддерживается с помощью сливного порога 2.

Поверхностные абсорберы имеют ограниченное применение вследствие громоздкости и относительно малой эффективности;

- *трубчатые абсорберы*. В них газ контактирует с пленкой жидкости (абсорбента), стекающей по поверхностям различных конфигураций. К аппаратам такого типа относятся: трубчатый пленочный абсорбер, абсорбер с листовой насадкой, абсорбер с восходящей пленкой;
- *насадочные абсорберы* — колонные аппараты, заполненные насадками (твердыми телами различной формы). Основным назначением насадки является распределение пленки жидкости по всей поверхности для создания развитой поверхности межфазного контакта. Эффективная насадка должна отвечать следующим требованиям: обладать большой поверхностью в единице объема; хорошо смачиваться орошающей жидкостью; оказывать малое гидравлическое

сопротивление газовому потоку; равномерно распределять орошающую жидкость; обладать химической стойкостью к воздействию жидкости и газа, которые контактируют в аппарате; иметь малый удельный вес; обладать высокой механической прочностью; иметь низкую стоимость. Выбор насадки обуславливается конкретными условиями применения, поскольку универсальной насадки не существует. Насадочные аппараты отличаются простотой устройства, возможностью работы с агрессивными средами, созданием высокой удельной поверхности контакта фаз и коэффициентами массопередачи. Недостатком насадочных колонн является то, что они мало пригодны при работе с загрязненными жидкостями, а в случае малых количеств орошающей жидкости не достигается полная смачиваемость насадки. Кроме того, в насадочных колоннах затруднен отвод теплоты, выделяющейся при поглощении газа;

- *барботажные абсорберы* — аппараты, в которых поверхность контакта между жидкостью и газом образуется в результате дробления газа на струи и пузырьки, барботирующие через слой жидкости. Такие режимы осуществляются в тарельчатых колоннах с колпачковыми, ситчатыми и провальными тарелками. Основной особенностью тарельчатых колонн является ступенчатый характер осуществляемых в них процессов, так как газ и жидкость последовательно вступают в контакт на отдельных стадиях (тарелках) аппарата.

Колонны с колпачковыми тарелками. В них газ барботирует через жидкость, выходя из прорезей колпачков, расположенных на каждой тарелке. В прорезях газ дробится на мелкие струйки, которые по выходе из прорези поднимаются вверх и, проходя через слой жидкости на тарелке, сливаются друг с другом.

Колонны с ситчатыми тарелками. В них газ проходит через отверстия тарелок и барботирует через слой жидкости на тарелке. При нормальной работе колонны жидкость не протекает через отверстия, так как она поддерживается снизу давлением газа. Высота слоя жидкости на тарелке составляет 25...30 мм и определяется положением верхних концов переливных труб. Ситчатые колонны отличаются простотой конструкции и высокой эффективностью. Основной их недостаток состоит в том, что они удовлетворительно работают лишь в ограниченном диапазоне нагрузок.

Колонны с провальными тарелками. В них отсутствуют переливные трубы, вследствие этого газ и жидкость проходят через одни и те же отверстия. Различают дырчатые провальные тарелки, решетчатые тарелки, трубчато-решетчатые тарелки. Благодаря отсутствию переливных устройств, провальные тарелки проще тарелок других типов.

Основные недостатки барботажных абсорберов — сложность конструкции и высокое гидравлическое сопротивление, связанное с пропусканием больших количеств газа через аппарат. Поэтому барботажные абсорберы применяют преимущественно в тех случаях, когда абсорбция ведется под повышенным давлением, так как при этом высокое гидравлическое сопротивление не существенно;

- *распыливающие абсорберы*. В них поверхность соприкосновения фаз создается путем распыления жидкости в массу газа на мелкие капли. Такие абсорберы изготавливают обычно в виде колонн, в которых распыление жидкости производится сверху, а газ движется снизу вверх. Применяются они, главным образом, для поглощения хорошо растворимых газов. Общая поверхность капель возрастает с увеличением плотности орошения и с уменьшением их размера и скорости движения. Поэтому для эффективной работы абсорбера большая плотность орошения имеет решающее значение. Распыление жидкости в абсорберах производят механическими и пневматическими форсунками, а также центробежными распылителями. Преимущества распыливающих абсорберов: простота конструкции, дешевизна, низкое гидравлическое сопротивление и возможность использования при абсорбции газов, сильно загрязненных механическими примесями. Основные их недостатки: трудность применения загрязненных жидкостей в качестве поглотителей, необходимость затрат энергии на распыление жидкости и применение больших плотностей орошения, трудность регулирования количества подаваемой жидкости.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются физический смысл и особенности процесса абсорбции?
2. Каким образом осуществляется процесс десорбции?
3. Какие основные типы абсорберов существуют?

2.4.3. Ректификация и дистилляция

Ректификация и дистилляция (перегонка) получили широкое распространение во многих отраслях промышленности для разделения однородных жидких смесей с различной температурой кипения образующих их жидкостей.

Дистилляция — процесс частичного испарения разделяемой смеси жидкостей и последующей конденсации образующихся паров, осуществляемой однократно или многократно. Составы жидкой и паровой фаз, образующихся при этом, заметно различаются, однако с помощью дистилляции нельзя получить компоненты исходного раствора в практически чистом виде. Это можно осуществить с помощью **ректификации** — разделения однородных жидких смесей, не находящихся в термодинамическом равновесии, на составляющие вещества или группы составляющих веществ в результате противоточного взаимодействия паровой и жидких фаз.

Составы паров в процессах дистилляции и ректификации определяются различной летучестью компонентов при одной и той же температуре. Исходя из этого различают низкокипящие (легколетучие) и высококипящие (труднолетучие) компоненты. Низкокипящий компонент имеет наибольшее давление паров при данной температуре по сравнению с давлением паров любого другого компонента смеси и, соответственно, наименьшую температуру кипения при одинаковом для всех компонентов давлении. Высококипящий компонент обладает наименьшим давлением или наивысшей температурой кипения.

Дистилляция в технологических процессах может осуществляться различными способами.

Простая дистилляция (простая перегонка) производится путем постепенного испарения исходной смеси. Образующиеся пары конденсируются. Простая дистилляция осуществляется в тех случаях, когда летучести разделяемых компонентов резко различаются, и к получаемым продуктам не предъявляют высоких требований по чистоте. Простая дистилляция может осуществляться периодически и непрерывно, однократно и многократно, с дефлегмацией и фракционированием.

Однократное испарение, или равновесная дистилляция, обычно осуществляется в непрерывном режиме. Исходная смесь нагревается в теплообменнике паром, топочными газами или электронагревом. Образовавшаяся парокапельная смесь поступает в сепара-

ционную камеру, откуда пар направляется в конденсатор, где конденсируется и отводится в сборник дистиллята, а жидкость — в сборник кубового остатка. Простая дистилляция может проводиться при атмосферном давлении или под вакуумом. По мере испарения содержание легколетучего компонента в дистилляте непрерывно уменьшается, составляя максимальную величину в начале процесса и минимальную — в его конце. Отбор дистиллята различного состава в отдельные сборники позволяет получать несколько фракций разного состава. Такой способ называется *фракционной перегонкой*. Степень разделения компонентов простой дистилляцией может быть повышена применением *дефлегмации*. По этой схеме пары, покидающие куб, поступают в дефлегматор, в котором они конденсируются не полностью, а частично. В данном случае конденсируется в основном менее летучий компонент, и пары обогащаются низкокипящим компонентом. Конденсат (называемый флегмой) из дефлегматора возвращается в перегонный куб и подвергается многократному испарению.

Дистилляцию в токе водяного пара применяют в том случае, когда компоненты исходной смеси не растворимы в воде, что позволяет снизить температуру кипения смеси и тем самым избежать разложения компонентов. Такая дистилляция применяется при переработке жирных кислот, эфирных масел, смол, а также для дезодорации — удаления веществ, обуславливающих неприятный запах масел, жиров и других продуктов. Процесс заключается в том, что исходная смесь загружается в куб, обогреваемый глухим паром через рубашку. Внутрь куба через барботер подают острый пар. Пары, выделившиеся при испарении смеси, направляют в конденсатор-холодильник. Образовавшийся конденсат поступает в сепаратор, где нерастворимые друг в друге жидкости расслаиваются. Дистилляция с водяным паром протекает в равновесных условиях. При этом острый пар выполняет две функции — теплоносителя и агента, снижающего температуру кипения. Недостаток метода — наличие влаги в продуктах перегонки.

Дистилляция в токе инертного газа проводится с использованием азота, водорода, диоксида углерода. Пар заменяется инертным газом в том случае, когда дистилляции подвергаются компоненты, растворимые в воде. Преимуществом использования инертных газов является также отсутствие нижнего температурного предела проведения процесса, поскольку применяемые газы при этих условиях не конденсируются. Недостатки данного метода: примесь газа в отгоняемом паре резко снижает коэффи-

циент теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси, что приводит к увеличению размеров холодильника-конденсатора; при такой конденсации часто образуется туман, отделить который от газа весьма трудно, поэтому возникают потери дистиллята с инертным газом.

Молекулярная дистилляция используется в технике для разделения компонентов, кипящих при высоких температурах и не обладающих необходимой термической стойкостью. Процесс проводится под вакуумом (остаточное давление 0,1...1,0 Па). При таком разрежении молекулы легко преодолевают силы взаимного притяжения, число столкновений между ними значительно сокращается, а длина свободного пробега резко возрастает. Если расстояние между поверхностями испарения и конденсации меньше длины свободного пробега молекул, то отрывающиеся от поверхности испарения молекулы летучего компонента попадают на поверхность конденсации и улавливаются на ней. Расстояние между поверхностями испарения и конденсации составляет обычно 20...30 мм, а разность температур между ними порядка 100 °С.

Ректификация — способ разделения однородных жидких смесей, состоящих из нескольких компонентов, основанный на противоточном взаимодействии двух неравновесных фаз — жидкости и пара, образующихся из этой смеси. При этом пар при движении постоянно обогащается низкокипящим (легколетучим), а жидкость — высококипящим (труднолетучим) компонентом. Процесс ректификации может осуществляться непрерывно и периодически под атмосферным давлением и избыточным давлением, а также под вакуумом.

Непрерывно действующая ректификационная установка (рис. 2.8) состоит из ректификационного массообменного аппарата — ректификационной колонны 1, представляющей собой вертикальный цилиндрический корпус, внутри которого расположены контактные устройства (насадка, тарелки). Снизу вверх по колонне движется поток пара, поступающий в ее нижнюю часть из испарителя 9, находящегося рядом или под самой колонной. Поступающий в колонну пар по составу — практически чистый труднолетучий компонент. На каждой тарелке при его перемещении по колонне происходит конденсация поднимающегося пара, и за счет теплоты его конденсации — испарение находящегося в этой зоне легколетучего компонента.

Таким образом, происходит постоянное удаление из выходящего пара труднолетучего компонента и обогащение его легко-

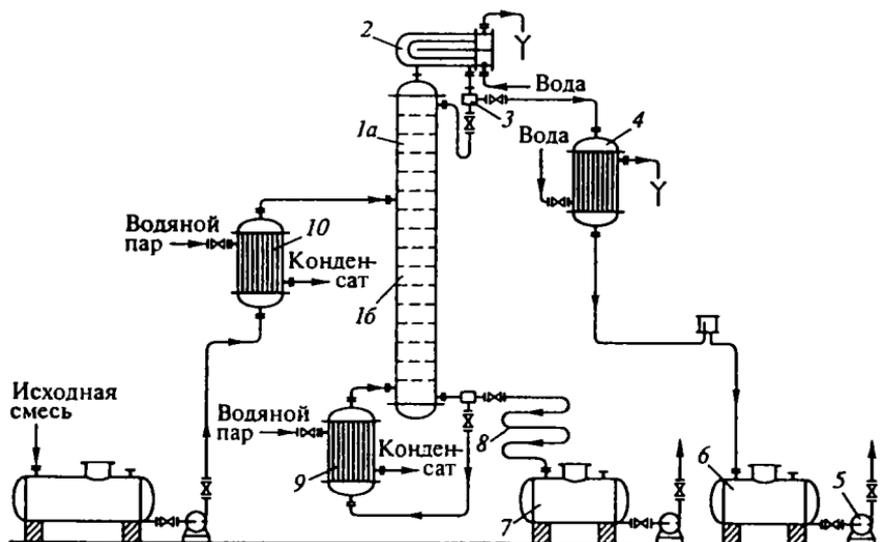


Рис. 2.8. Схема непрерывно действующей ректификационной установки: 1 — ректификационная колонна (1а, 1б — соответственно укрепляющая и исчерпывающая части); 2 — дефлегматор; 3 — делитель; 4 — холодильник — теплообменник; 5 — насос; 6, 7 — сборники; 8 — холодильник; 9 — испаритель; 10 — теплообменник

летучим. В результате из верхней части колонны выгружаются пары практически чистого легколетучего компонента, который конденсируется в дефлегматоре 2.

Получаемая жидкость разделяется в делителе 3 на два потока. Первый поток — флегма, возвращается назад в колонну 1, создавая тем самым нисходящий поток жидкости, состоящий практически из чистого легколетучего компонента. Стекая вниз по колонне и взаимодействуя с восходящим паром, флегма постоянно обогащается конденсирующимся из нее труднолетучим компонентом, заменяющим постоянно испаряющийся легколетучий компонент. В результате жидкость, достигающая нижней части колонны и поступающая в испаритель 9, состоит практически из низколетучего компонента.

Подаваемую на разделение исходную смесь подогревают до температуры кипения в теплообменнике 10 и подают в колонну, в зону (или в тарелку), положение которой определяют в результате расчета контактного ректификационного аппарата. Зона питания (или тарелка питания) делит колонну на две части. Верхняя, или укрепляющая часть, часть 1а обеспечивает наибольшее

укрепление поднимающихся паров, т. е. обогащение их легколетучим компонентом. Нижняя, или кубовая (исчерпывающая), часть 1б, обеспечивает наибольшее удаление из жидкости легколетучего компонента.

Второй поток жидкости, получаемый в дефлегматоре 2 и называемый *дистиллятом*, поступает в холодильник-теплообменник 4, а затем в сборник 6, откуда перекачивается в качестве целевого продукта насосом 5. Жидкость, выходящая из нижней части колонны, также делится на два потока. Первый поток возвращается в испаритель 9, откуда в виде пара подается назад в колонну, второй, называемый *кубовым остатком*, после охлаждения в холодильнике 8 направляется в сборник 7.

Периодически действующие ректификационные установки представляют собой фактически укрепляющую часть ректификационного аппарата и работают по такому же принципу (рис. 2.9).

Исходная смесь загружается в куб 1, где нагревается до температуры кипения и испаряется. Пары проходят через ректификационную колонну 2, взаимодействуя в противотоке с жидкостью, возвращаемой из дефлегматора 3. В дефлегматоре обогащенные легколетучим компонентом пары конденсируются, и конденсат поступает в делитель потока 4. Флегма из делителя направляется на орошение ректификационной колонны, а дистиллят через холодильник 5 направляется в сборник 6 или 7. Эти

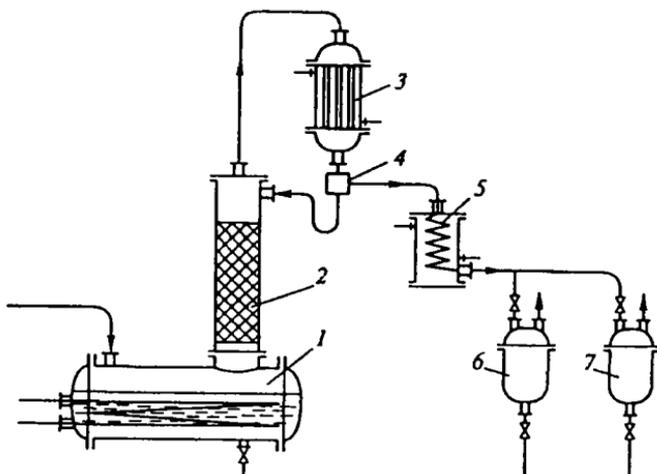


Рис. 2.9. Схема ректификационной установки периодического действия: 1 — куб; 2 — ректификационная колонна; 3 — дефлегматор; 4 — делитель потока; 5 — холодильник; 6, 7 — сборники

установки могут работать в режимах постоянного расхода флегмы и постоянного состава дистиллята.

Для обеспечения режима постоянного состава дистиллята процесс ректификации необходимо проводить при непрерывно изменяющемся флегмовом числе, минимальном в начале процесса и максимальном в конце.

Экстрактивная ректификация предназначена для разделения смесей компонентов с близкими температурами кипения и очень низкой летучестью. В этом случае в исходную смесь вводится компонент, предназначенный для резкого увеличения летучести основных компонентов. Он должен быть менее летуч, чем оба исходных, и хорошо растворять низколетучий компонент разделяемой смеси.

Установка для экстрактивной ректификации состоит из двух обычных ректификационных колонн, в первую из которых поступает на разделение исходная смесь компонентов A и B . В укрепленную часть колонны одновременно вводится разделяющий компонент C . Выбор компонента C производят в соответствии с ранее приведенными условиями, чтобы он хорошо растворялся в компоненте B , в то время как A и C взаимно нерастворимы (или ограниченно растворимы). Летучести компонента A и смеси $B + C$ становятся существенно различными, и в результате процесса ректификации в дистилляте получают практически чистый компонент A , а смесь $B + C$ удаляется из первой колонны в виде кубового остатка и подается на разделение во вторую последовательно установленную колонну. В ней осуществляется разделение смеси на компоненты B и C . Компонент B является целевым и отбирается из установки, а регенерированный компонент C возвращается в первую колонну для повторного использования.

Азеотропная ректификация смеси A и B , находящейся в термодинамическом равновесии, осуществляется аналогичным способом. К азеотропной смеси (азеотропная смесь — жидкая смесь, находящаяся в термодинамическом равновесии с газовой фазой одинакового с ней состава) добавляют третий компонент C , образующий с одним из разделяемых компонентов новую (более летучую, чем исходная) азеотропную смесь. Последняя выделяется в качестве дистиллята, а другой практически чистый компонент удаляется в виде кубового остатка. Примером такого процесса является разделение азеотропной смеси этиловый спирт—вода, где в качестве вводимого разделяющего компонента применяется бензол, образующий с водой и спиртом тройную азеотропную

смесь с более низкой температурой кипения (64,8 °С), чем для азеотропной смеси спирта с водой (~78 °С).

Для ректификации используют практически **аппараты колонного типа** — насадочные и барботажные ректификационные колонны. *Насадочные ректификационные колонны* обычно применяют с кольцевой насадкой. Эти колонны небольшого диаметра (до 1 м) применяют при ректификации в вакууме и для разделения химически агрессивных веществ. *Барботажные ректификационные колонны* применяют с колпачковыми, ситчатыми и провальными тарелками. Значительное сопротивление барботажных колонн при ректификации обычно не существенно (кроме процесса ректификации в вакууме), так как вызывает лишь некоторое повышение давления и, следовательно, температуры кипения в нижней части колонны и не связано с дополнительным расходом энергии. Барботажные колонны являются наиболее распространенными ректификационными аппаратами, поскольку дают возможность разделять в них компоненты с любой степенью четкости. Чаще всего применяют колонны с колпачковыми тарелками. Колонны с ситчатыми и провальными тарелками применяют в установках, работающих с постоянной нагрузкой.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются физический смысл и назначение процессов дистилляции и ректификации?
2. Какие технологические способы осуществления процесса дистилляции существуют?
3. В чем заключается принцип работы периодически действующих ректификационных установок?
4. В чем заключается принцип экстрактивной и азеотропной ректификации?
5. Какие типы ректификационных аппаратов используют в промышленности?

2.4.4. Экстракция

Экстракция — массообменный процесс извлечения компонента из жидких смесей или твердых веществ жидким растворителем (экстрагентом), избирательно растворяющим только извлекаемые компоненты.

В соответствии с агрегатным состоянием взаимодействующих фаз различают *жидкостную экстракцию*, характеризующуюся извлечением компонента, растворенного в одной жидкости другой жидкостью, не растворимой и не смешивающейся с первой, и *экстрагирование (выщелачивание)*, заключающееся в растворении компонента, находящегося в твердой фазе, жидкостью с последующим удалением его вместе с ней.

Жидкостная экстракция. Принцип экстракции в системе жидкость—жидкость основан на различной растворимости распределяемого компонента в распределяющих веществах. Жидкостная экстракция находит широкое применение в различных отраслях промышленности: при производстве технологических органических веществ и редких металлов, очистке продуктов и полупродуктов от примесей, получения ядерного горючего, синтезе лекарственных веществ, а также в радиационной химии, процессах нефтепереработки и нефтехимии. Из-за простоты осуществления, низких энергетических затрат и высокой эффективности процесса жидкостной экстракции она успешно конкурирует, а иногда используется в сочетании с другими процессами разделения (ректификацией, выпариванием и др.). Ею можно разделять азеотропные смеси, а также смеси компонентов с близкими температурами кипения и малой относительной летучестью.

В процессе жидкостной экстракции исходная смесь F , содержащая распределяемое вещество, вступает в контакт с экстрагентом (растворителем) S , в который в результате массопередачи переходит компонент. После разделения (отстаивание, центрифугирование или другой метод) получают две новые фазы — экстракт E , представляющий собой раствор распределяемого вещества в экстрагенте, и рафинат R — исходный раствор, из которого частично или полностью извлечено распределяемое вещество.

В ряде случаев следующей стадией за процессом экстракции и разделения полученных продуктов является регенерация экстрагента (удаление из экстракта ранее поглощенного компонента), которую можно осуществить ректификацией, перегонкой в токе водяного пара, повторной экстракцией, реже — кристаллизацией или химической обработкой.

При выборе экстрагента (растворителя) к его составу предъявляются следующие требования:

- селективность (избирательность) по отношению к извлекаемому компоненту;
- высокая растворимость извлекаемого компонента;

- возможность проведения эффективной регенерации;
- разность плотностей с исходной смесью, достаточная для расслоения полученных продуктов;
- безопасность при работе (отсутствие токсичности, пожаро- и взрывобезопасность);
- сохранение свойств при обработке, хранении, регенерации; низкая стоимость; доступность.

Основные промышленные экстракты, применяемые в процессах экстракции, подразделяются на три класса:

- органические кислоты или их соли (алифатические монокарбоновые кислоты, нафтеновые кислоты, сульфокислоты, фенолы, оксиды, кислые эфиры фосфорной кислоты), которые извлекают катионы металлов в органическую фазу из водной;
- соли органических оснований (соли первичных, вторичных и третичных аминов, а также четвертичных аммониевых оснований), с помощью которых извлекают анионы металлов из водных растворов;
- нейтральные растворители (вода, спирты, простые и сложные эфиры, альдегиды и кетоны), с помощью которых осуществляют разные механизмы извлечения в зависимости от кислотности исходного раствора.

Равновесие в процессах жидкостной экстракции подчиняется так называемому *закону распределения*. В соответствии с этим законом отношение равновесных концентраций распределенного между двумя жидкими фазами вещества при постоянной температуре есть величина постоянная, называемая *коэффициентом распределения*. По его величине судят об экстракционной способности экстрагента. Значение коэффициента распределения находится в пределах от 1 до 10 000, при этом его увеличение соответствует более высокой способности экстрагента извлекать целевой компонент. Коэффициент распределения зависит от свойств взаимодействующих систем, наличия химического взаимодействия извлекаемого компонента с растворителем.

Кинетика процесса экстракции (кинетические закономерности) определяются основными законами массопередачи. В процессе происходит взаимодействие каплей дисперсной фазы и дисперсионной среды. При этом основными стадиями этого процесса являются: переход распределяемого вещества из среды к поверхности капли, а затем внутрь нее или, наоборот, из капли через поверхность раздела фаз в ядро потока среды.

Промышленные **экстракторы**, как правило, представляют собой устройства непрерывного действия. Экстракторы периодического действия применяют в малотоннажных производствах и при лабораторных работах.

По характеру изменения состава жидких фаз **экстракционные аппараты** делятся на смесительно-отстойные, колонные (дифференциально-контактные) и центробежные.

Смесительно-отстойные экстракторы. В них происходит смешение и разделение фаз в каждой ступени. Поэтому концентрации извлекаемого компонента в экстрагенте и обрабатываемой смеси изменяются ступенчато. Эти экстракторы могут представлять собой один аппарат, в котором процесс осуществляется периодически (перемешивание — расслоение), либо два аппарата, обеспечивающих непрерывный процесс: в первом происходит процесс экстракции (перемешивание), во втором — разделение полученных продуктов (отстаивание). Наиболее распространенными являются аппараты первого типа, т. е. экстракторы с мешалками.

Колонные экстракторы. В них осуществляется непрерывный или близкий к непрерывному контакт экстрагента и исходного раствора. Фазы движутся противотоком друг к другу и непрерывно разделяются на выходе из аппарата. Концентрация извлекаемого компонента в фазах изменяется также непрерывно по всему аппарату.

Колонные экстракторы подразделяются на распылительные (полые), насадочные, тарельчатые, пульсационные и роторно-дисковые. Распылительные (полые) экстракторы представляют собой пустотелые колонны, заполненные одной из взаимодействующих жидкостей. Если экстрактор заполнен тяжелой жидкостью, то более легкая распыляется в нее с помощью диспергирующего устройства, установленного в нижней части аппарата. Если в качестве сплошной фазы используется легкая жидкость, тяжелая жидкость распыляется в нее сверху. На некотором уровне капли дисперсной фазы сливаются и образуют слой, отделенный от сплошной фазы поверхностью раздела. Над ней установлен патрубок для отвода экстракта. Из нижней части колонны постоянно отводится сплошная фаза в качестве рафината. Эти колонны обладают высокой производительностью, но малоэффективны, что объясняется укрупнением капель дисперсной фазы и обратным перемешиванием вследствие возникновения местных циркуляционных токов, нарушающих противоток фаз.

Насадочные экстракторы представляют собой распылительные экстракторы, заполненные насадочными телами, что способствует многократному дроблению и слиянию капель дисперсной фазы, а также сводят к минимуму обратное перемешивание. По конструкции и простоте устройства они близки к распылительным экстракторам, но производительность их несколько ниже, так как некоторая часть колонны занята насадкой. Эффективность разделения в этих аппаратах также невысокая.

Колонные экстракторы с тарелками (перегородками) применяют для уменьшения перемешивания, а также организации благоприятных гидродинамических режимов проведения процессов экстракции. Колонные экстракторы с механическим перемешиванием фаз применяют при малой разности плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды и значительном межфазном поверхностном натяжении, затрудняющем дробление из-за естественного течения жидкости. Высокая степень диспергирования в этом случае достигается с помощью мешалок различных конструкций. В пульсационных экстракторах ввод дополнительной энергии в двухфазный поток осуществляется путем придания возвратно-поступательного движения (пульсации) жидкостям в рабочей зоне аппарата. Пульсация жидкостей увеличивает турбулизацию потоков и степень дисперсности фаз, повышая тем самым эффективность массопередачи в насадочных экстракторах или экстракторах с ситчатыми тарелками.

В центробежных экстракторах в качестве дополнительной механической энергии, обеспечивающей эффективное диспергирование, повышение относительной скорости движения фаз, а также интенсивного разделения, используется центробежная сила. Эти аппараты являются интенсивно работающими. Значительные скорости движения жидкости обуславливают их высокую производительность и компактность. Их недостатком является сложность конструкции, и, соответственно, значительные затраты на эксплуатацию и ремонт, высокая стоимость.

Все перечисленные типы экстракторов используются в химической и других отраслях промышленности. Причем выбор той или иной конструкции определяется, прежде всего, конкретными условиями ее использования, а также технико-экономической целесообразности.

В технологических процессах используются различные *схемы экстракции*: однократная; многократная с перекрестным током растворителя (экстрагента); многократная противотоком раство-

рителя; непрерывная противоточная; ступенчатая противоточная. *Однократная экстракция* осуществляется как периодически, так и непрерывным способом. При проведении непрерывного процесса однократной экстракции смесь рафината и экстракта непрерывно отводится из смесительного устройства в отстойник, где осуществляется их разделение. *Множественная экстракция с перекрестным током растворителя* обеспечивает более высокую эффективность проведения процесса. В ходе экстракции исходный раствор на каждой стадии обрабатывается свежим растворителем. Процесс обработки осуществляется до тех пор, пока не получен рафинат требуемого состава. Недостатком данного способа является значительный расход растворителя и его невысокое насыщение на стадиях процесса экстракции. *Множественная экстракция с противотоком растворителя* состоит из нескольких стадий смесительно-отстойной экстракции. Свежий растворитель вводится в процесс на последней стадии обработки исходной смеси, а получаемый экстракт в качестве растворителя перемещается на предыдущую стадию. Таким образом, на каждой ступени осуществляется однократная экстракция очищаемого рафината движущимся противотоком ему растворителем. *Непрерывная противоточная экстракция* происходит в колонных экстракторах (полых, насадочных, тарельчатых). При этом составы взаимодействующих фаз могут меняться как непрерывно, так и скачкообразно от ступени к ступени.

Экстрагирование (экстракция в системе жидкость—твердое тело) представляет собой процесс извлечения одного или нескольких компонентов, распределенных в твердом веществе. Извлекаемый компонент либо в твердом, либо в жидком состоянии может находиться в твердом веществе, скелет которого играет роль инертного носителя.

Извлечение распределяемого компонента из твердой структуры жидкостью эффективно по следующим причинам:

- жидкое состояние вещества позволяет обеспечить максимальную поверхность контакта фаз;
- диффундирование компонентов к границе раздела фаз и в обратном направлении в жидкости ускоряется вследствие увеличения подвижности молекул и микрообъемов среды;
- молекулы, находящиеся в растворе, более активны, чем молекулы вещества, находящегося в твердом состоянии.

Механизм процесса экстрагирования имеет две основные стадии, определяющие его кинетику: диффузию вещества из пор

твёрдого скелета-носителя к поверхности вещества и диффузию от поверхности через пограничный слой в ядро потока. Движущей силой процесса является разность концентраций. Если извлекаемое вещество находится в растворённом состоянии, то равновесие наступает при равенстве концентраций компонента в порах и растворителе. При экстракции компонентов, находящихся в твёрдом состоянии, равновесие наступает в момент достижения в растворителе концентрации насыщения по извлекаемому компоненту. Повышение температуры способствует возрастанию движущей силы, вызывает увеличение коэффициента молекулярной диффузии, что значительно интенсифицирует процесс экстрагирования. Интенсивное перемешивание позволяет обеспечить максимальную поверхность контакта фаз.

Процесс экстрагирования осуществляется периодически и непрерывно. Периодическое экстрагирование применяют обычно в малотоннажных производствах, когда другие операции этого технологического процесса также осуществляются периодически. В крупнотоннажных производствах экстрагирование осуществляется обычно непрерывными способами, которые в зависимости от движения раствора и твёрдой фазы делятся на прямоток и противоток, и их различные комбинации.

При организации потока растворителя и твёрдого материала следует учитывать, что эффективность экстрагирования противотоком выше, чем прямотоком. Это обусловлено тем, что средняя скорость процесса увеличивается при извлечении вещества свежим растворителем из внутренней части частиц перед удалением их из процесса, а концентрированным растворителем — с поверхности частиц в момент их ввода в установку.

Основные конструкции аппаратов для экстрагирования: карусельные, конвейерные, вертикальные колонные, горизонтальные шнековые и лопастные, барабанные, смесительно-отстойные и др.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются принцип и назначение процессов экстракции?
2. Какие требования предъявляют к экстрагентам (растворителям) в процессах жидкостной экстракции?
3. Какие основные конструкции жидкостных экстракторов применяются в промышленности?
4. В чем заключаются принцип и особенности процесса экстрагирования?

2.4.5. Адсорбция

Адсорбция — массообменный процесс избирательного поглощения компонентов из газовых (паровых) систем и жидкостей твердыми поглотителями-адсорбентами.

Адсорбция широко применяется в промышленности при очистке и осушке газов, выделении компонентов из растворов, разделении газожидкостных смесей. Процесс адсорбции используется в хроматографических методах разделения газовых смесей и в газовой хроматографии — эффективном методе анализа состава газов и паров, а также в качестве одного из методов инженерной защиты окружающей среды. По сравнению с другими массообменными процессами адсорбция наиболее эффективна в случае малого содержания извлекаемого компонента в исходной смеси.

Различают два вида адсорбции: физическую и химическую.

Физическая адсорбция вызывается силами взаимодействия молекул поглощаемого вещества с адсорбентом без образования химических связей.

Химическая адсорбция (хемосорбция) характеризуется химическим взаимодействием между средой и адсорбентом, что позволяет образовывать новые химические соединения на поверхности и внутри адсорбента.

Оба вида адсорбции экзотермичны. Однако если теплота, выделяющаяся при физической адсорбции газов и паров соизмерима с их теплотой конденсации (85...125 кДж/кмоль), а в случае растворов даже меньше, то теплота химической адсорбции достигает нескольких сотен кДж/кмоль.

Десорбция — процесс обратный адсорбции, заключающийся в извлечении из адсорбента адсорбированных веществ, предназначенный для восстановления его первоначальных свойств.

К сорбционным процессам относятся также *ионообменные процессы*, заключающиеся во взаимодействии растворов электролитов с сорбентами — ионитами, обладающими способностью обменивать присутствующие в них свободные ионы на ионы, находящиеся в растворе.

Простота и высокая эффективность ионообменных процессов позволяет реализовать их на любом уровне: от лабораторных колонок и тонких слоев до многотонных промышленных фильтров. Эти процессы применяются для глубокой очистки растворов (деминерализация воды в теплоэнергетике, удаление из сточных вод вредных примесей, регенерация электролитов галь-

ванических цехов); получение кислот и щелочей из солей, а также солей требуемого состава; извлечение металлов из обедненных руд и океанических вод и т. д.

Равновесие сорбционных процессов описывается в виде зависимостей поглощательной способности от температуры и концентрации извлекаемого вещества.

Условия адсорбционного равновесия процесса изучают при постоянной температуре, получаемая функция называется *изотермой адсорбции*. Конкретная форма этой зависимости определяется свойствами и механизмом взаимодействия адсорбента и адсорбируемого вещества.

Количество вещества, поглощенного адсорбентом, часто называют *активностью*, на которую оказывают влияние следующие факторы:

- *природа поглощаемого вещества*, как правило, чем больше молекулярный вес поглощаемого газа и чем меньше растворимость поглощаемого вещества в жидкости, тем выше активность;
- *температура*, с увеличением температуры равновесная активность адсорбента уменьшается;
- *давление*, с увеличением давления равновесная активность адсорбента увеличивается;
- *примеси в фазе*, из которой поглощается вещество, уменьшают равновесную активность.

В промышленных условиях десорбцию часто проводят насыщенным водяным паром, так как при этом выполняются практически все вышеперечисленные условия.

Важными характеристиками адсорбента является его статическая (количество адсорбируемого вещества, которое поглощается к моменту достижения равновесия единицей массы или объема адсорбента при данной температуре) и динамическая (количество адсорбируемого вещества, поглощенного единицей массы или объема адсорбента при пропускании через него газа или жидкости до начала проскока) активности. Момент проскока — это момент обнаружения поглощаемого вещества в выходящем из адсорбера потоке газа или жидкости. Динамическая активность всегда меньше статической. Поэтому расход адсорбента на установку определяют обычно по динамической активности адсорбента.

Состояние равновесия при ионном обмене, так же как и при адсорбции, описывается изотермами равновесия. На равновесие в

процессе ионного обмена влияют природа ионита и поглощаемых ионов, температура и рН раствора. Так, в случае ионной сорбции двух ионов с разными зарядами ионит преимущественно поглощает ион с наибольшим зарядом. Активность и избирательность ионитов также уменьшается при повышении температуры. Влияние рН раствора на состояние равновесия различно: с увеличением рН емкость катионитов увеличивается, а для анионитов — уменьшается.

Адсорбенты. В качестве адсорбентов в промышленности используют твердые материалы, обладающие большой удельной поверхностью. Большое значение имеют также химическая стойкость адсорбента в рабочей среде, его механическая прочность и размер частиц.

Одна из наиболее распространенных групп адсорбентов — это *активированные угли*. Они получают путем сухой перегонки природных углеродистых материалов (дерево, кость и др.). Активированные угли имеют удельную поверхность 600...1700 м²/г и обладают гидрофобными свойствами (поглощают органические вещества и не поглощают воду). Этот адсорбент применяется для выделения веществ, как из газовой, так и из жидкой фаз. Недостатки активированных углей — горючесть и низкая механическая прочность.

Силикагель — высушенный гель двуокиси кремния. Различные сорта силикагеля имеют удельную поверхность 300...800 м²/г. Размер пор может изменяться в широких пределах в зависимости от принятой технологии приготовления. Силикагель наиболее прочен по сравнению с другими адсорбентами. Являясь гидрофобным адсорбентом, он не может использоваться для поглощения компонентов из водных растворов, но успешно применяется при адсорбции из газов и из неводных растворов.

Алюмогель получается термической обработкой гидрата оксида алюминия, гидрофобен, также как и силикагель, он может применяться при температурах выше 500 °С.

Молекулярные сита — адсорбенты с очень тонкими порами, размеры которых соизмеримы с размерами молекул. К ним относятся *цеолиты* — водные алюмосиликаты натрия и кальция. Использование молекулярных сит позволяет разделять смеси веществ по размерам их молекул и гибко управлять процессом адсорбции. Изменение условий приготовления цеолитов позволяет регулировать их поглотительную способность и селективность и использовать в качестве ионообменных смол.

Иониты, также как и адсорбенты, для эффективного процесса обмена должны обладать максимальной поверхностью контакта с раствором. Различают природные и искусственные иониты. *Природные иониты* (глины, апатиты, угли, целлюлоза и т. д.) нестойки в щелочах и кислотах, что существенно ограничивает их применение. *Искусственные иониты* (плавленные цеолиты, гидроксиды железа и алюминия, а в особенности синтетические смолы) позволили значительно расширить область применения ионного обмена. Синтетические смолы, используемые для изготовления ионитов, чаще всего представляют собой решетку (матрицу), в которой находятся функциональные активные группы (ионы), определяющие свойства ионитов.

Основные способы проведения адсорбции таковы:

- с неподвижным слоем адсорбента;
- с движущимся слоем адсорбента;
- с псевдооживленным слоем адсорбента.

Аппараты с неподвижным слоем адсорбента представляют собой вертикально установленную цилиндрическую емкость, заполненную адсорбентом, подаваемым через штуцер и выгружаемым после окончания срока службы через люки. Эти аппараты работают периодически, причем полный цикл их работы сводится обычно к четырем стадиям. Первая стадия — собственно адсорбция — насыщение поглотителя адсорбируемым компонентом. Вторая — десорбция — выделение поглощенного компонента из адсорбента. Третья стадия — сушка адсорбента — удаление остатка конденсата (образовавшегося на стадии десорбции за счет воздействия регенерирующего пара) из адсорбента горячим воздухом, подаваемым через штуцер. Четвертая стадия — охлаждение адсорбента — поскольку активность адсорбента повышается с уменьшением его температуры, после сушки он обрабатывается холодным воздухом, который также подается через штуцер. Включение в технологическую схему нескольких адсорберов с неподвижным слоем адсорбента позволяет создавать условия для его непрерывной работы. При этом в одном аппарате осуществляется стадия адсорбции, а в другом (других) — стадии десорбции и регенерации адсорбента. Недостатки таких аппаратов: сложность управления; необходимость частых переключений, пропарок, сушек и охлаждений адсорбента вызывает неизбежные потери материалов; непропорциональный расход водяного пара и воздуха; велика вероятность возникновения каналов в слое адсорбента.

Аппараты с движущимся слоем адсорбента подразделяются на аппараты в виде полых колонн, применяемые в основном для адсорбции компонентов из газовых и паровых смесей и аппараты с механическими транспортными приспособлениями, используемые при обработке жидкостей. Достоинством этих аппаратов является возможность регулирования режимов их работы, подбора аппаратов оптимальной конструкции и размеров, осуществления непрерывности процесса. Технологические схемы с использованием этих аппаратов отличаются сложным оборудованием, а также возможностью истирания адсорбента.

Аппараты с псевдооживленным слоем адсорбента подразделяются на одно- и многоступенчатые. Они обеспечивают хорошие условия для осуществления интенсивного массообмена в связи с постоянным перемешиванием частиц адсорбента в слое.

Одноступенчатый адсорбер с псевдооживленным слоем (рис. 2.10) представляет собой цилиндрический вертикальный корпус 2, внутри которого смонтированы газораспределительная решетка 3 и пылеотделяющее устройство 1.

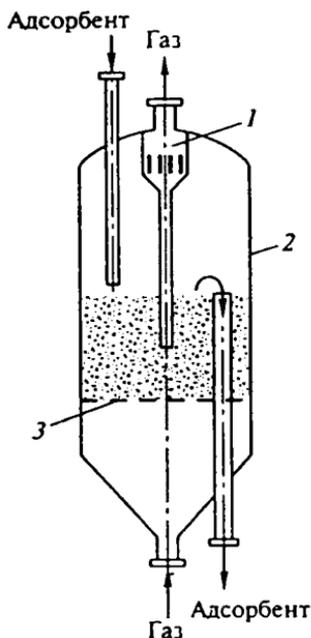


Рис. 2.10. Схема адсорбера с псевдооживленным слоем адсорбента: 1 — пылеотделяющее устройство; 2 — корпус; 3 — газораспределительная решетка

Адсорбент загружается и выводится из аппарата через соответствующие трубы, находящиеся в его верхней и нижней частях. Рабочий газ вводится в адсорбер через нижний патрубок и выводится через верхний.

Многоступенчатый адсорбер состоит из вертикально расположенных одноступенчатых адсорберов, адсорбент в которых перемещается сверху вниз со ступени на ступень, а рабочий газ движется навстречу потоку снизу вверх.

В *аппаратах непрерывного действия с псевдооживленным слоем на тарелках* адсорбент поступает из сепаратора на верхнюю ситчатую тарелку и по перетокам спускается вниз к выходу из последней тарелки в десорбционную секцию. Основным недостатком этого способа является вероятность сильного измельчения адсорбента, а следовательно — необходимость установки эффективной системы его улавливания.

Ионообменная аппаратура по конструкции и принципу действия близка к адсорбционным установкам. Цикл ионообменного процесса включает в себя следующие стадии: сорбция ионов из исходного раствора; отмывка ионита от исходного раствора; регенерация ионита; отмывка ионита от регенерирующего раствора. Для ионного обмена используются аппараты периодического и непрерывного принципа действия с неподвижным, движущимся, пульсирующим, перемешиваемым и циркулирующим ионитом.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются принцип и назначение процессов адсорбции и ионного обмена?
2. Какие вещества используются в качестве адсорбентов и ионообменных смол?
3. Какие основные типы аппаратов применяются для проведения процессов адсорбции и ионного обмена?

2.4.6. Сушка

Сушка — процесс удаления влаги из твердого материала путем ее испарения и отвода образовавшихся паров. Обезвоживание материалов осуществляется обычно с целью повышения ка-

чества целевого продукта, предупреждения слеживаемости, удешевления транспортировки, уменьшения коррозии аппаратуры и трубопроводов, повышения теплотворной способности (для топлив). Этот вид обработки является сравнительно дорогим технологическим процессом. Поэтому перед сушкой часть влаги удаляется более дешевым механическим путем — фильтрованием, прессованием, центрифугированием.

Высушиваемые материалы в зависимости от способа сушки условно подразделяют на следующие группы:

- жидкотекучие материалы — истинные и коллоидные растворы, эмульсии и суспензии;
- пастообразные материалы;
- твердые дисперсные материалы, обладающие сыпучестью во влажном состоянии (пылевидные, зернистые и кусковые);
- тонкие гибкие материалы (ткани, пленки, бумага, картон);
- штучные, массивные, крупногабаритные материалы и изделия: керамика, элементы строительных конструкций, изделия из древесины;
- изделия, подвергающиеся сушке после грунтования, окраски, склеивания и других работ на поверхности.

По способу подвода теплоты к высушиваемому материалу различают следующие виды сушек:

- *конвективную* (теплота для осуществления процесса передается материалу при его непосредственном контакте с сушильным агентом, например, нагретым воздухом, топочными и другими газами);
- *контактную (кондуктивную)* (теплота передается материалу через разделяющую их стенку);
- *радиационную* (теплота передается инфракрасными лучами);
- *диэлектрическую* (теплота выделяется в материале в результате воздействия на него токов высокой частоты);
- *сублимационную* (высушивание материала осуществляется в замороженном состоянии при глубоком вакууме).

Наиболее часто применяют в технике конвективную и кондуктивную сушки. Остальные способы относятся к специальным видам, и их применяют реже.

Процессу сушки, как любому массообменному процессу, соответствует обратный процесс — поглощение твердым материалом влаги из окружающей среды, содержащей либо пары влаги, либо смесь паров влаги с другими газами.

Различают несколько форм связи влаги с материалом (если под влагой понимать воду, то в порядке убывания энергии связи).

Химически связанная влага — гидратная или кристаллизационная, входящая в состав самого химического соединения, в процессе сушки не удаляется. Для ее удаления необходимо либо высокотемпературное воздействие (прокалка), либо химическая обработка.

Механически (капиллярно) связанная влага, заполняющая макро- и микрокапилляры, может быть удалена не только при сушке, но и при механических воздействиях.

Физико-химически связанная влага (адсорбционная и осмотическая) — влага, находящаяся в микропорах и связанная с материалом на молекулярном уровне адсорбционными и осмотическими силами.

Значения концентрации влаги в материале используются для описания кинетики процесса сушки, а также расчета аппаратов, в которых он осуществляется. Значения концентраций влаги определяются: *влажностью, влагосодержанием и относительной влажностью*.

Кинетика сушки определяется изменением во времени средней влажности материала, которую строят обычно по опытным данным для каждого конкретного материала. Кривая сушки состоит из двух участков, соответствующих различным ее периодам, которые хорошо видны на графической зависимости скорости сушки от влажности материала. Первый период соответствует постоянной скорости сушки или внешней диффузии (поверхностного испарения). В этот период поверхность материала покрыта влагой, что обеспечивается его высокой влажностью в начале сушки и возмещением испаряющейся влаги вследствие диффузии ее из внутренних слоев. Скорость диффузии влаги равна скорости испарения воды с поверхности высушиваемого материала. Это означает, что подвод воды к поверхности твердого тела полностью компенсирует ее удаление с этой поверхности. Скорость суммарного процесса в этот период ограничивается скоростью поверхностного испарения, т. е. скоростью отвода молекул пара от поверхности. Факторами, определяющими скорость сушки в первый период, являются:

- влажность газа (чем суше газ, тем больше движущая сила процесса, а значит, больше скорость сушки);

- температура газа (чем выше температура газа, тем выше температура поверхности материала, а следовательно, больше упругость насыщенного пара и выше скорость сушки);
- скорость газа (величина коэффициента массоотдачи зависит от скорости газового потока, а увеличение скорости влечет за собой рост турбулентности потока, сдувание, т. е. уменьшение толщины пограничного ламинарного слоя газа и, следовательно, ускорение переноса в нем вещества — диффузии пара);
- поверхность испарения (скорость испарения увеличивается прямо пропорционально поверхности испарения, т. е. скорость сушки растет при измельчении материала, так как при этом увеличивается удельная поверхность).

Второй период — это время падения скорости сушки или внутренней диффузии. Здесь подвод влаги к внешней поверхности высушиваемого материала оказывается недостаточно быстрым для компенсации испаряющейся с нее влаги из-за увеличения глубины ее извлечения. Изменение скорости сушки в этот период зависит от того, насколько быстро по сравнению со скоростью испарения будет подходить влага из внутренних слоев к наружным. Это изменение зависит от формы связи влаги с материалом, структуры твердого вещества, толщины куска и т. д. Интенсификация второго периода процесса сушки может быть достигнута путем перемешивания высушиваемого материала, способствующего механическому переносу влаги из внутренних слоев к поверхности контакта с сушильным агентом.

Конвективная сушка — сушка влажного материала в потоке горячего воздуха или топочных газов, которые при этом являются тепло- и влагоносителями. Ее еще называют воздушной сушкой, так как в качестве сушильного агента используют часто воздух.

Существуют различные виды сушки:

- однократная воздушная сушка;
- сушка с многократным промежуточным подогревом воздуха;
- сушка с частичным возвратом отработавшего воздуха. Исходный воздух смешивается с частью отработавшего воздуха, который возвращается на вход в сушилку вентилятором, далее нагревается калорифером до требуемой температуры и после этого взаимодействует с высушиваемым материалом в сушилке;

- сушка с замкнутой циркуляцией высушивающего газа. Применяется в тех случаях, когда в качестве высушивающих используют чистые и дорогостоящие газы, либо осуществляется сушка вредных, токсичных продуктов. В этих условиях отработанный газ не может отводиться в атмосферу, и появляется необходимость замкнутой его циркуляции с последующей утилизацией.

Используя тот или иной вариант сушки, можно лишь ускорить или замедлить процесс массопередачи, сделать более мягкими или более жесткими условия его проведения, но нельзя существенно повлиять на расход теплоты, поскольку она определяется только начальными и конечными параметрами высушивающего газа.

Контактная сушка, или сушка на греющих поверхностях, осуществляется при атмосферном давлении и под вакуумом, понижающим температуру сушки и увеличивающим ее скорость. Она отражает два периода осуществления процесса: нагревание материала до начальной температуры сушки и собственно сушка.

Радиационная сушка осуществляется подводом к материалу тепловой энергии потоком инфракрасных лучей. Поскольку удельные тепловые потоки к материалу в десятки раз превышают соответствующие величины при контактной и конвективной сушке, происходит интенсивный нагрев и испарение влаги из высушиваемых тел. В качестве нагревающих устройств применяют специальные электролампы с увеличенными нитями накаливания, либо экраны или панели, нагреваемые газом или электрическим током. В современных установках эффективно используются излучающие насадки с беспламенными горелками. Радиационные сушилки компактны и эффективны для сушки тонколистových материалов и окрашенных поверхностей.

Диэлектрическая сушка (сушка токами высокой частоты) предназначена для высушивания толстослойных материалов, когда необходимо регулировать скорость сушки, температуру и влажность не только на поверхности, но и в глубине материала. Физические основы этого вида сушки заключаются в том, что под действием электрического поля ионы и электроны в материале меняют направление движения синхронно с изменением заряда электродов, полярные молекулы приобретают вращательное движение, а неполярные молекулы поляризуются в результате смещения их зарядов. Эти процессы приводят к выделению теплоты, которая равномерно нагревает материал, способствуя

перемещению влаги к периферийным слоям и испарению ее с поверхности тела. Таким способом можно сушить материалы, обладающие диэлектрическими свойствами. Диэлектрическая сушка требует расходов энергии, в несколько раз превышающих соответствующие расходы на контактную или конвективную сушку, а также более сложного и дорогого оборудования.

Сублимационная сушка — удаление влаги, находящейся в материале в виде льда, переводом в пар, минуя жидкое состояние. Теплота, расходуемая на испарение влаги, подводится к материалу излучением от обогреваемых теплоносителем (горячей водой) полых плит.

Сушку производят при мягком обогреве замороженного материала, так как количество передаваемой теплоты не должно превышать ее расход на сублимацию льда без его плавления. Способ сублимационной сушки дорогостоящ и целесообразен только в тех случаях, когда к высушенному продукту предъявляются высокие требования по сохранению свойств при длительном хранении (в частности, биологических). Этот вид сушки применяют для высушивания плазмы крови, лекарственных препаратов, высококачественных продуктов питания и т. д.

Стремление к интенсификации процессов сушки и производительности единичного агрегата привело к созданию разнообразных конструкций *сушильного оборудования*. Сушилки классифицируют:

- по принципу действия (периодические и непрерывные);
- по виду сушильного агента (воздушные, газовые, паровые);
- по величине давления (атмосферные, вакуумные);
- по направлению движения материала и сушильного агента для конвективных сушилок (противоточные, прямоточные, с перекрестным током);
- по состоянию высушиваемого слоя (неподвижные, движущиеся, взвешенные и фонтанирующие);
- по способу подвода теплоты к высушиваемому материалу: контактные (кондуктивные), конвективные (воздушные и газовые), специальные.

Сушилки для контактной сушки используют в тех случаях, когда непосредственный контакт высушиваемого материала и сушильного агента недопустимы. Виды сушилок: сушильный шкаф, гребковые сушилки, вальцовые сушилки. Эти виды сушилок могут работать под вакуумом, что имеет ряд преимуществ перед сушкой при атмосферном давлении, например, независи-

мость процесса от атмосферных условий, создание стерильности среды, сушка при низких температурах, быстрота сушки, меньший расход теплоты и др. Недостатки: высокая стоимость сушильного агрегата.

Конвективные (воздушные) сушилки, как правило, состоят из трех элементов: камеры, в которой происходит контакт высушиваемого материала с сушильным агентом, узлов подогрева и транспорта сушильного агента.

Виды конвективных сушилок: камерные, туннельные, ленточные, барабанные, распылительные, пневматические и сушилки с взвешенным (псевдоожженным) слоем. Камерные сушилки — это простейшие сушилки периодического действия, применяют их, главным образом, при высушивании материалов, требующих длительной сушки или сложного индивидуального режима. Туннельные сушилки представляют собой длинные камеры, внутри которых по рельсам перемещаются вагонетки с высушиваемым материалом. Ленточные сушилки предназначены для сушки сыпучих материалов и представляют собой камеру, в которой расположены одна или несколько движущихся замкнутых лент. Барабанные сушилки применяют для сушки различных сыпучих материалов. Распылительные сушилки применяют для жидких пищевых продуктов, ферментов и растворов минеральных солей, красителей и т. д. Сушилки с взвешенным (псевдоожженным) слоем применяют для сушки сыпучих материалов, а также паст и растворов. Пневматические сушилки применяют для интенсивного удаления свободной, т. е. поверхностной влаги.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются назначение и основные принципы процесса сушки?
2. Какие виды сушки различают по способу подвода теплоты к влажному материалу?
3. Какие основные виды сушилок существуют?

2.4.7. Кристаллизация

Кристаллизация — массообменный процесс перехода вещества из раствора (или расплава) в твердую фазу. Особенностью процесса кристаллизации является возможность получения рас-

пределяемого компонента в чистом виде, связанная с различной растворимостью выделяемого вещества и примесей, которые остаются в растворе.

Кристаллизация сопровождается явлениями полиморфизма, образования кристаллогидратов и изоморфизма.

Полиморфизм — явление образования при различных термодинамических условиях одним и тем же веществом разных по симметрии и форме кристаллов.

Кристаллогидраты — кристаллы, содержащие в структуре химически связанные молекулы воды, причем одно и то же вещество в зависимости от условий кристаллизации и хранения может включать различное число молекул воды.

Изоморфизм — явление образования смешанных кристаллов из химически однотипных и сходных по кристаллографическим признакам веществ.

Кристаллизация осуществляется вследствие изменения растворимости кристаллизующего компонента в исходной смеси. Растворы, находящиеся в равновесии с твердой фазой при определенной температуре, называются *насыщенными*. Вещества, у которых растворимость увеличивается с ростом температуры, называются веществами с *положительной растворимостью*. Вещества с растворимостью, понижающейся с увеличением температуры, называются веществами с *обратной растворимостью*.

Если концентрация вещества превышает его растворимость, растворы называются *пересыщенными* и являются неустойчивыми, легко переходящими в состояние насыщения. При этом из них выпадает часть твердой фазы.

Растворимость в зависимости от свойств растворенного вещества и растворителя в определенном температурном интервале характеризуется кривой растворимости.

На диаграмме состояния (рис. 2.11) растворов нанесены линии растворимости некоторого вещества в зависимости от температуры. Область А называется неустойчивой, или лабильной; область Б — относительно устойчивой, или метастабильной; область В — областью ненасыщенных растворов.

Пересыщенные растворы с концентрациями, соответствующими лабильной области, кристаллизуются мгновенно, в метастабильной же области эти растворы какое-то время остаются без изменения. Границы метастабильной области зависят от температуры раствора, скорости его охлаждения, перемешивания и других факторов.

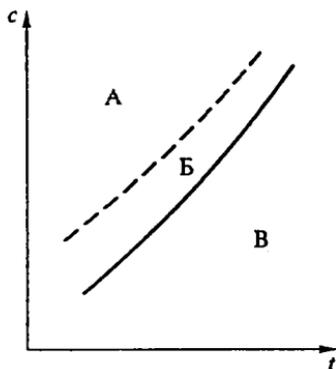


Рис. 2.11. Диаграмма состояния раствора: А — неустойчивая область; Б — метастабильная область; В — область ненасыщенных растворов

Скорость процесса кристаллизации зависит от температуры раствора, степени его пересыщения, скорости образования зародышей кристаллизации, интенсивности перемешивания и других факторов.

Зародыши (или центры) кристаллизации образуются из пересыщенных или переохлажденных растворов самопроизвольно. Скорость их образования может быть увеличена повышением температуры, перемешиванием, встряхиванием, присутствием примесей (например, поверхностно активных веществ, способных концентрироваться на поверхности раздела фаз, что приводит к снижению межфазного поверхностного натяжения), ультразвуковым воздействием и др.

Различают две стадии образования кристалла: возникновение в пересыщенном растворе центра кристаллизации; рост кристалла на основе этого зародыша (при условии его термодинамической устойчивости). Размеры получаемых кристаллов зависят, прежде всего, от условий кристаллизации и времени осуществления процесса. Кроме этого, на их гранулометрический состав влияют скорость зародышеобразования, скорость роста кристаллов, дробление частиц в ходе процесса в результате соударения друг с другом и столкновения со стенками аппаратуры, агрегации и т. д.

Различают кристаллизацию из растворов, наиболее часто используемую в технологических процессах, и кристаллизацию из расплавов. Одновременное получение большого числа кристаллов, в частности, в производстве минеральных удобрений, называется массовой кристаллизацией.

Кристаллизацию из растворов осуществляют:

- *изогидрическим способом* — изменением температуры (для веществ с прямой растворимостью — понижением температуры; для веществ с обратной растворимостью — повышением температуры);
- *изотермическим способом* — удалением части растворителя испарением или вымораживанием; добавлением в раствор веществ, связывающих растворитель.

Кристаллизация из расплава, осуществляется постепенным его осаждением с целью получения отливок, пластинок, гранул и др.

К *комбинированным способам кристаллизации* относятся вакуум-кристаллизация, кристаллизация с испарением части растворителя в потоке носителя (чаще всего воздуха) и фракционная кристаллизация, используемая для разделения бинарных и многокомпонентных расплавов на индивидуальные компоненты или фракции, содержащие определенные компоненты.

Технологический процесс кристаллизации из растворов состоит из следующих стадий:

- кристаллизация;
- отделение образовавшихся кристаллов;
- перекристаллизация;
- промывка и сушка кристаллов.

Последние две стадии не являются обязательными и назначаются в соответствии с требованиями к конечному продукту. Первая стадия осуществляется в аппаратах специальных конструкций, называемых кристаллизаторами.

Различие требований к целевому продукту и условий осуществления процесса обусловило многообразие конструкций кристаллизаторов.

По способу работы они подразделяются на аппараты периодического и непрерывного действия.

Аппараты периодического действия используют обычно в кристаллизационных установках небольшой производительности. Они достаточно экономичны, просты по конструкции. Они обеспечивают требуемое качество продукта. Недостатком является относительно большая доля вспомогательных операций (загрузки, разгрузки и т. д.).

Кристаллизаторы непрерывного действия применяют для обеспечения высокой производительности.

По способу создания перенасыщения все кристаллизаторы можно разделить на выпарные, охлаждательные, испарительные, химические и др.

Выпарные кристаллизаторы, используемые для проведения термической кристаллизации с удалением части растворителя в виде пара, чаще всего представляют выпарные аппараты с внутренней циркуляционной трубой, подвесной греющей камерой, выносной греющей камерой и др. как при естественной, так и при вынужденной циркуляции раствора. Однако при кристаллизации возникают специфические условия — наличие твердой фазы в растворе, возможность отложения кристаллов на стенках аппарата и греющих трубах, необходимость регулирования размера кристаллов в продукте. Все это требует ряда изменений в конструкции обычных выпарных аппаратов. Схема выпарного аппарата — кристаллизатора с подвесной греющей камерой и нутч-фильтрами представлена на рис. 2.12.

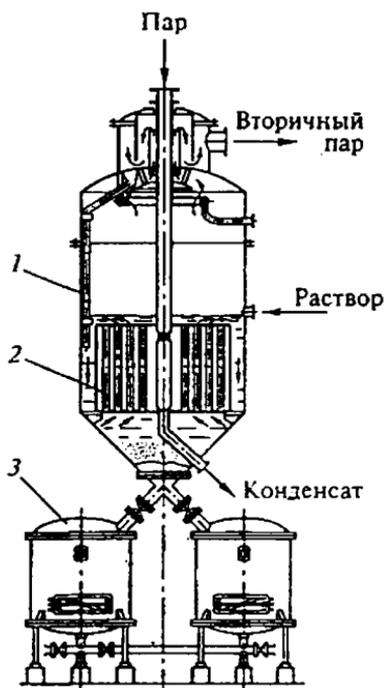


Рис. 2.12. Схема выпарного аппарата — кристаллизатора с подвесной греющей камерой и нутч-фильтрами: 1 — кристаллизатор; 2 — нагревательная камера; 3 — нутч-фильтр

Нутч-фильтр — фильтр периодического действия, состоящий из небольшой камеры с перфорированным днищем, покрытым фильтровальной тканью, работает под вакуумом, используется в малотоннажных производствах. В схеме нутч-фильтры работают поочередно для отделения кристаллов.

Охлаждающие кристаллизаторы применяют для изогидрической кристаллизации растворов веществ с прямой растворимостью. В малотоннажных производствах используют кристаллизаторы, оборудованные перемешивающими устройствами, теплообменными рубашками или змеевиками. На рис. 2.13 представлен кристаллизатор емкостного типа со змеевиком, расположенным внутри аппарата, и лопастной мешалкой.

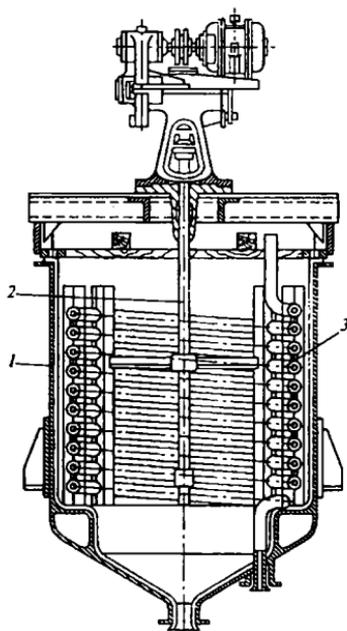


Рис. 2.13. Схема кристаллизатора емкостного типа со змеевиком и лопастной мешалкой: 1 — кристаллизатор; 2 — лопастная мешалка; 3 — змеевик

Для непрерывной кристаллизации применяют барабанный кристаллизатор, представляющий собой цилиндрический сосуд с водяной рубашкой, установленный на роликах под небольшим углом к горизонту. Недостатком этих аппаратов является значительная кристаллизация внутренней поверхности аппарата, по-

этому для разрушения кристаллов на стенке в барабан могут помещать специальные насадки (цепи и штанги).

Испарительные кристаллизаторы можно подразделить на следующие виды:

- кристаллизаторы с воздушным охлаждением, в них охлаждение раствора производится путем непосредственного соприкосновения его с воздухом. Вследствие этого одновременно с охлаждением происходит испарение части растворителя;
- вакуум-кристаллизаторы, в них создается пониженное давление с помощью вакуум-насоса, что способствует испарению части растворителя с одновременным охлаждением раствора.

Аппараты этого типа нашли широкое распространение в промышленности благодаря высокой производительности, герметичности, простоте изготовления и обслуживания, надежности в работе.

Химические кристаллизаторы используются для проведения в одном аппарате химической реакции и кристаллизации образующейся при этом твердой фазы.

Контрольные вопросы

1. Для чего используется кристаллизация и каковы основные принципы этого процесса?
2. Какие технические способы осуществления процесса кристаллизации используют в промышленности?
3. Какие типы аппаратов используются для осуществления процесса кристаллизации?

2.4.8. Мембранные процессы

Мембранные процессы — процессы разделения смесей на компоненты с использованием полупроницаемых перегородок (мембран).

При взаимодействии с мембраной из исходной смеси выделяются прошедший через нее чистый компонент — *пермеат* и оставшийся перед мембраной концентрированный (очищенный) продукт — *ретант*.

Основные характеристики мембранного процесса состоят в следующем:

- *проницаемость*, или *удельная производительность* G , определяемая как

$$G = W/F,$$

где W — расход пермеата;

F — поверхность мембраны;

- *селективность (избирательность)* φ :

$$\varphi = (x_A - y_A)/x_A = 1 - y_A/x_A;$$

- *фактор разделения* α_{AB} :

$$\alpha_{AB} = (y_A/y_B)/(x_A/x_B),$$

где x_A, x_B — мольные концентрации компонентов A и B в исходной смеси;

y_A, y_B — мольные концентрации компонентов A и B в пермеате.

К мембранным процессам относятся:

- *баромембранные процессы* разделения жидких сред, включающие микрофильтрацию, ультрафильтрацию и обратный осмос (мембранное разделение растворов под давлением, превышающим осмотическое; осуществляется путем преимущественного проникновения растворителя через полупроницаемую мембрану). Эти процессы в указанной последовательности отличаются уменьшением размеров задерживаемых частиц и молекул, а также возрастанием необходимого для этого давления, которое является движущей силой процесса. В отличие от фильтрации при осуществлении баромембранных процессов на поверхности мембраны осадок практически не образуется, а возникают два раствора различной концентрации. Микрофильтрация применяется для очистки жидкостей от коллоидных частиц и микрочастиц (0,02...10 мкм). Перепад давлений в процессе составляет 0,1...1,0 МПа. Ультрафильтрация применяется для разделения растворов высоко- и низкомолекулярных соединений. Мембраной задерживаются частицы (молекулы) размером 0,001...0,02 мкм (молекулярные массы 300...300 000). Перепад давлений на мембране составляет 0,1...2,0 МПа. Обратный осмос применяется для разделения

растворов низкомолекулярных веществ (0,0001...0,001 мкм). Рабочий перепад давлений должен превышать осмотическое давление для данных растворов и составляет обычно 1,0...25,0 МПа;

- *диализ* — процесс мембранного разделения растворов веществ, имеющих различные молекулярные массы, движущей силой которого является разность концентраций компонентов по обе стороны мембраны;
- *электродиализ* — мембранный процесс, применяемый для разделения электролитов. Перенос ионов через мембрану в данном случае осуществляется под действием разности электрических потенциалов, являющейся движущей силой процесса;
- *испарение через мембрану (первапорация)* — разделение жидких смесей, при котором исходный раствор контактирует с мембраной с одной ее стороны, а проникающий компонент в виде паров отводится с другой стороны мембраны в вакуум или поток инертного газа;
- *диффузионное разделение газов* — разделение, основанное на различных коэффициентах диффузии газов через непористые полимерные мембраны под действием градиента концентраций.

Мембранные процессы нашли широкое применение в различных технологических операциях: очистке и концентрировании растворов; разделении близко кипящих компонентов, азеотропных и нетермостойких смесей; отделении высокомолекулярных веществ от низкомолекулярных растворителей; водоподготовке и глубокой очистке сточных вод и т. д.

Достоинства мембранных процессов: возможность непрерывного их осуществления, низкие энергетические затраты, невысокие температуры осуществления процесса, легкость сочетания с другими процессами разделения, высокая селективность при разделении практически любых систем благодаря широкому диапазону существующих мембран и их свойствам, возможность масштабирования процесса.

Основным недостатком данного процесса является относительная недолговечность функционирования мембран.

Для эффективного осуществления мембранных процессов разделения необходим, прежде всего, правильный выбор самой мембраны, к которой предъявляется ряд требований: высокая разделительная способность (селективность) и удельная произ-

водительность (проницаемость), химическая стойкость, механическая прочность, относительно низкая стоимость, постоянство характеристик мембран в процессе эксплуатации.

Основные типы промышленных мембран таковы:

- *пористые мембраны*, осуществляющие разделение по размеру частиц. Их используют для фильтрации и ультрафильтрации. Высокая селективность может быть достигнута, когда размер растворенного (диспергированного) вещества больше, чем размер пор в мембране. Селективность в основном определяется соотношением размеров пор и разделяемых частиц, причем материал мембраны относительно мало влияет на показатели процесса разделения;
- *непористые мембраны*, способные отделять друг от друга молекулы примерно одинакового размера. Разделение происходит из-за различных коэффициентов диффузии разделяемых веществ через мембрану. Селективность и проницаемость таких мембран обусловлена свойствами материала, из которого они изготовлены. Мембраны такого типа используются в процессах перапарации и газоразделения;
- *жидкие мембраны*, в которых определяющую роль играют молекулы-переносчики, находящиеся внутри пор данной мембраны. Перемещаемый компонент может быть газообразным или жидким, ионным или не ионным.

По природе мембран различают:

- живые (биологические);
- из природных веществ (модифицированные и регенерированные);
- неорганические (металлические, керамические, стеклянные и т. д.);
- синтетические органические (полимерные: полиэтилен, полипропилен, фторопласт, ацетилацетат и т. д.).

На процесс мембранного разделения влияют различные факторы:

- *концентрационная поляризация* — повышение концентрации растворенного вещества у поверхности мембраны вследствие избирательного отвода растворителя через мембрану. При разделении газовых смесей концентрационная поляризация мала и может не приниматься в расчет. Однако она оказывает значительное влияние при проведении жидкофазных процессов, а также в процессах разделения испарением через мембрану.

Основные отрицательные эффекты концентрационной поляризации заключаются в следующем:

- уменьшение движущей силы процесса;
- возможность образования на мембране слоя нерастворимого осадка, который может привести к изменению рабочих характеристик мембран, в том числе к возрастанию гидравлического сопротивления;
- возможность изменения структуры и даже разрушения материала мембраны;
- увеличение омического сопротивления в электромембранных процессах.

Для уменьшения отрицательного влияния концентрационной поляризации перемешивают раствор над мембраной посредством увеличения скорости исходной смеси над ее поверхностью, а также применения турбулизирующих вставок;

- *давление над мембраной* существенно влияет на проницаемость и селективность мембранного процесса. С увеличением разности давлений увеличиваются проницаемость и селективность мембран из полимерных материалов. Повышение селективности с увеличением давления объясняется деформацией и уплотнением структуры мембраны, приводящих к сужению пор.

Знакопеременные деформации, связанные с уменьшением и увеличением давления, могут привести к необратимому изменению рабочих характеристик мембран, которые делают невозможным их дальнейшее использование.

Для мембран с жесткой структурой проницаемость увеличивается с повышением давления, а селективность у таких мембран от давления практически не зависит;

- *температура исходной смеси* оказывает значительное влияние на проведение процесса мембранного разделения. Повышение температуры смеси, понижающей ее вязкость и увеличивающей скорость диффузии молекул через мембрану, приводит к увеличению проницаемости.

Большинство полимерных мембран не выдерживают эксплуатации при высоких температурах, поэтому их используют при нормальных условиях;

- *природа разделяемых веществ* оказывает влияние на селективность и в меньшей степени на проницаемость мембран. Например: неорганические вещества задерживаются мем-

бранами лучше, чем органические; вещества с большей молекулярной массой задерживаются лучше, чем с меньшей; вещества, образующие связь с мембраной (например, водородную), задерживаются тем лучше, чем менее прочна эта связь;

- *повышение концентрации растворенных веществ* в исходной смеси приводит к увеличению осмотического, а следовательно, и рабочего давлений. Кроме того, увеличение вязкости смеси снижает проницаемость мембран.

Следует учитывать, что большинство разделяемых систем являются многокомпонентными, и одни растворенные вещества влияют на разделение других веществ, находящихся в растворе. Поэтому переносить экспериментальные данные по проницаемости и селективности, полученные для бинарных растворов, на многокомпонентные смеси нужно с осторожностью.

В настоящее время применяются различные *мембранные устройства* для разделения смесей. Основные требования, предъявляемые к аппаратам для мембранного разделения смесей, таковы:

- большая удельная рабочая поверхность мембран в единице объема аппарата;
- равномерное распределение разделяемой смеси вдоль поверхности мембраны;
- создание относительно высоких скоростей ее движения относительно мембраны для уменьшения влияния эффекта поляризационной концентрации;
- герметичность;
- прочность;
- простота сборки и монтажа;
- надежность в эксплуатации.

По конструктивным особенностям мембранные устройства можно отнести к аппаратам: с плоскокамерными мембранными элементами; с трубчатыми мембранными элементами; со спиральными мембранными элементами; с мембранами в виде полых волокон.

Аппараты с плоскокамерными фильтрующими элементами (рис. 2.14) имеют относительно невысокую производительность и включают параллельно установленные разделяющие элементы, состоящие из двух мембран 1, расположенных с противоположных сторон плоской пористой дренажной пластины 2, предназначенной для сбора и стока пермеата. Разделяющие элементы расположены на небольшом расстоянии друг от друга (0,5..5 мм),

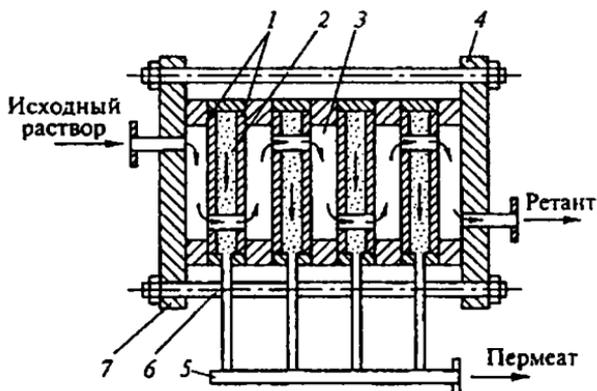


Рис. 2.14. Схема аппарата с плоскокамерными мембранными элементами: 1 — мембраны; 2 — дренажная пластина; 3 — камера; 4, 7 — плиты; 5 — коллектор; 6 — штанга

образуя камеры для протока разделяемой смеси. Пакет разделяющих элементов зажимается между двумя плитами 4, 7 и стягивается штангами 6. Исходный раствор последовательно перетекает через все камеры, концентрируется в виде концентрата (ретанта) и выводится из аппарата. Пермеат, прошедший через мембраны, поступает в пористые дренажные пластины и через коллектор 5 также выводится из аппарата. Аппараты этого типа просты в изготовлении, удобны в монтаже и эксплуатации, но имеют низкое значение удельной поверхности мембран, приходящейся на единицу объема аппарата, а также требуют ручной сборки и разборки при замене мембран.

Аппараты с трубчатыми мембранными элементами состоят из мембран и дренажного каркаса. Дренажный каркас состоит из трубки, выполненной из пористого материала (металлокерамика, пластмасса, металлическая сетка и т. д.), обеспечивающей отвод пермеата, и микропористой подложки, исключающей вдавливание мембран в каналы трубок под внешним давлением. Мембранные элементы в трубчатых аппаратах могут находиться внутри и снаружи трубок в кожухе, а также мембраны могут располагаться комбинированно. В промышленности широкое распространение получили мембранные аппараты с внутренней установкой мембран. Преимущества этих устройств: малая материалоемкость; низкое гидравлическое сопротивление; равномерное движение потока вдоль поверхности мембраны и отсутствие застойных зон; удобство сборки и разборки; герметичность конструкции. Недос-

татки аппаратов этого типа: относительно низкая удельная поверхность мембран на единицу объема; требуют ручной сборки и разборки конструкции.

Аппараты со спиральными мембранными элементами имеют значительно более высокую удельную поверхность мембран на единицу объема ($300\text{--}800 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Это обеспечивается использованием спиральных мембранных элементов, устанавливаемых в цилиндрический корпус высокого давления.

Спиральный мембранный элемент состоит из двух мембран, расположенных с противоположных сторон дренажного слоя и накручиваемых в виде спирали на трубу отвода пермеата. Вместе с пакетом мембран накручивается сетка-сепаратор, образующая спиральный канал, в который под давлением подается смесь. В процессе навивки торцы дренажного слоя с мембранами проклеивают для герметизации.

К достоинствам аппаратов со спиральными мембранными элементами относятся: высокая производительность; малая материалоемкость; большая плотность упаковки; механизированная сборка мембранных элементов.

Недостатки аппаратов этого типа: сложность монтажа пакетов; необходимость замены всего пакета при повреждении мембраны; высокое гидравлическое сопротивление.

Аппараты с мембранами в виде полых волокон имеют очень высокую плотность укладки мембран, равную $20\ 000\text{--}30\ 000 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Эта величина достигается за счет использования мембран из полых волокон диаметром $45\text{--}200 \text{ мкм}$ с толщиной стенки $10\text{--}50 \text{ мкм}$ для осуществления процессов обратного осмоса и диаметром $200\text{--}1000 \text{ мкм}$ с толщиной стенки $50\text{--}200 \text{ мкм}$ для проведения процессов ультрафильтрации. Полые мембранные волокна могут выдерживать значительные давления ($1\text{--}10 \text{ МПа}$), поэтому необходимость в дренажных и поддерживающих устройствах отсутствует. При этом исходный раствор при различных конструкциях аппаратов может подаваться как внутрь полых волокон, так и снаружи.

Аппараты этого типа просты по устройству, технологичны в изготовлении, легки и удобны в сборке и эксплуатации, имеют низкую материалоемкость. Недостатки — повышенные требования к предварительной очистке разделяемых смесей от взвеси, замена всего пучка в случае разрыва одного из волокон, довольно сложная система герметизации, уменьшение рабочей поверхности (до 10 %) при вклеивании их в шайбу.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса мембранного разделения?
2. Какие процессы относятся к мембранным?
3. Какие типы мембран используются в промышленности?
4. Какие типы аппаратов используются для осуществления процессов мембранного разделения?

2.5. Механические процессы

2.5.1. Измельчение твердых тел

Измельчение — процесс многократного разрушения твердого тела на части под воздействием внешних сил, превышающих силы молекулярного притяжения в измельчаемом теле.

Процесс измельчения сопровождается многократным увеличением удельной поверхности измельчаемого материала, что позволяет резко интенсифицировать химические и массообменные процессы, скорость которых определяется площадью межфазного взаимодействия. При проведении процессов измельчения учитывают следующие свойства твердых тел:

- *прочность* при сжатии и изломе: очень прочные, более $1800 \cdot 10^{-5}$ Па; прочные, от 1500 до $1800 \cdot 10^{-5}$ Па; средней прочности, от 1000 до $1500 \cdot 10^{-5}$ Па; мягкие, от 500 до $1000 \cdot 10^{-5}$ Па; особо мягкие, от 100 до $500 \cdot 10^{-5}$ Па; с низкой механической прочностью, менее $100 \cdot 10^{-5}$ Па;
- *твердость* оценивается по 10-балльной шкале Мооса. За нулевой балл принята твердость талька, за десятый — твердость алмаза. Твердость твердых тел определяет не только параметры проведения процесса измельчения, но и скорость изнашивания применяемых при этом рабочих органов машин.

Так как частицы твердого материала имеют неправильную форму, при расчетах используют их эквивалентный диаметр либо размер отверстий сит, через который они просеиваются.

Важное значение для оценки измельченного материала имеют *удельная поверхность* его частиц, а также *гранулометрический состав*, характеризующий долю или процент массы частиц каждого класса крупности в пробе.

Процесс измельчения характеризуется *степенью измельчения* — отношением среднего размера твердого тела до измельчения к среднему размеру материала после измельчения.

В зависимости от крупности исходного и измельченного твердого материала различают процессы *дробления* и *измельчения*. В зависимости от конечной крупности получаемого материала условно выделяют несколько их стадий (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Стадии дробления и измельчения

Стадии	Размер до измельчения, мм	Размер после измельчения, мм
Дробление:		
крупное	≥ 500	100...400
среднее	100...500	20...100
мелкое	50...100	4...20
Измельчение:		
крупное	20...100	1,0...4,0
среднее	5...50	0,1...1,0
тонкое	1,0...10	0,01...0,1
сверхтонкое	0,1...1,0	<0,01

Основными способами измельчения являются удар, раздавливание, истирание, раскалывание и резание. При ударе под воздействием динамических нагрузок в теле возникают напряжения, приводящие к его разрушению. При этом различают разрушение при стесненном и свободном ударе. Стесненный удар обеспечивается наличием нескольких рабочих органов, оказывающих воздействие на тело. Свободный удар обеспечивается столкновением с рабочим органом машины или другим измельчаемым телом. Удар применяется в роторных и молотковых дробилках, молотковых и струйных мельницах, дезинтеграторах.

При раздавливании определяющими являются напряжения сжатия под воздействием статической нагрузки между рабочими органами. Раздавливание применяется в щековых дробилках.

При истирании основные разрушающие напряжения — напряжения сдвига. Истирание в комбинации с раздавливанием

применяется в валковых и шаровых мельницах, валковых и конусных дробилках.

При раскалывании в теле создаются изгибающие напряжения, этот способ измельчения применяется в дискозубых дробилках.

При резании возникают напряжения сдвига, данный способ применяется при измельчении пластичных материалов, древесных отходов, бумаги и т. п.

Схемы измельчения. В основу схемы измельчения положен принцип — «не дробить ничего лишнего», так как процесс измельчения любым способом связан с затратой большого количества энергии. Полученный после каждой стадии измельченный продукт подвергается рассеву (классификации). Куски требуемых размеров поступают на следующую стадию, а более крупные возвращаются на повторное измельчение. При этом чем прочнее материал, тем меньше выбирается значение степени измельчения, а следовательно, увеличивается число самих стадий.

Измельчение может осуществляться в открытом и замкнутом циклах, а также в один или несколько приемов.

При измельчении в открытом цикле (рис. 2.15, *а, б*) твердый материал проходит через измельчающее устройство только один раз. По такой схеме проводят измельчение, когда нет необходимости соблюдать четкий размер частиц в продуктах размола. В ряде случаев для сокращения энергозатрат исходный материал классифицируют и измельчают только крупные куски, а отдельную мелочь присоединяют к конечному продукту (рис. 2.15, *б*).

При измельчении в замкнутом цикле (рис. 2.15, *в, г*) измельчающая машина функционирует совместно с классифицирующей

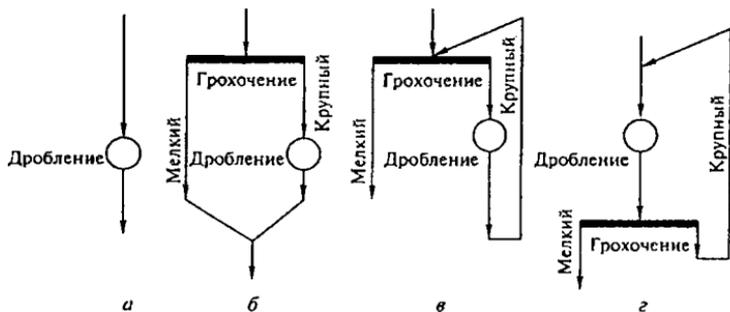


Рис. 2.15. Схемы дробления: *а* — открытый цикл; *б* — открытый цикл с предварительным грохочением; *в* — замкнутый цикл с предварительным и поверочным грохочением; *г* — замкнутый цикл с грохочением

шим и транспортирующим устройствами, при помощи которых крупный продукт непрерывно возвращается на повторное измельчение. Такие схемы, позволяющие рационально использовать энергию и повысить производительность оборудования, применяют для получения конечного продукта однородного состава. Количество материала, возвращаемого на повторное измельчение, называемое циркуляционной нагрузкой, может изменяться в пределах 25...600 % количества исходного материала.

Оборудование для измельчения классифицируют:

- по организации процесса (периодическое и непрерывное);
- по крупности измельчаемого продукта (машины крупного, среднего и мелкого дробления, тонкого и коллоидного измельчения);
- по применяемому в них способу измельчения (раскалывающего и разламывающего действия; раздавливающего действия; истирающего и раздавливающего действия; ударного действия, ударного и истирающего действия; коллоидное измельчение).

Кроме этого, его классифицируют по виду энергии, используемой для измельчения: механические дробилки; механические мельницы (с мелющими телами); взрывные, пневматические, электрогидравлические, электроимпульсные, электротермические размольно-дробильные аппараты; аэродинамические и пневмомеханические мельницы (струйные аппараты без мелющих тел).

Существуют следующие виды измельчающего оборудования:

- *щечовые дробилки* применяют для дробления крупного кускового материала. Дробление твердого материала, подаваемого сверху, осуществляется в момент сближения подвижной щеки и неподвижной. При прохождении между ними вниз размер частиц измельчаемого продукта уменьшается. Достоинства этого вида дробилок: простота и надежность конструкции, широкая область применения, компактность и легкость обслуживания. Недостатки: периодический характер воздействия дробящего усилия и неуравновешенность движущихся масс, вызывающие шум и вибрацию;
- *конусные дробилки* применяют для крупного, среднего и мелкого измельчения. Эти дробилки отличаются постоянным воздействием на дробимый материал дробящей поверхностью. Существуют два типа конусных дробилок: конусная дробилка с подвесным валом и головкой в виде крутого конуса; конусная дробилка с консольным валом и

головкой в виде полого конуса (грибовидная дробилка). Достоинства — высокая производительность из-за непрерывности измельчения материала одновременно раздавливанием и изгибом; спокойная, уравновешенная работа; высокая степень измельчения;

- *валковая дробилка* состоит из двух параллельно расположенных гладких или зубчатых цилиндрических валков, установленных в станине машины и вращающихся навстречу друг другу. При вращении они захватывают поступающий сверху материал и дробят раздавливанием. Степень измельчения валковой дробилки не более 10 и регулируется изменением расстоянием между валками;
- *молотковые дробилки* — машины ударного действия и используются, как правило, для измельчения малоабразивных материалов. Молотковые дробилки различают по числу роторов (одно- и двухроторные), а также по расположению молотков в одной или нескольких плоскостях вращения (одно- и многорядные);
- *дезинтегратор* состоит из двух дисков, закрепленных на сосновых валах. Диски приводятся во вращение в противоположных направлениях от шкивов. На дисках по концентрическим окружностям расположены пальцы (била). Каждый ряд пальцев одного диска расположен с небольшим зазором между двумя рядами пальцев другого диска. Материал поступает в дезинтегратор сбоку через питатель и измельчается ударами быстро вращающихся пальцев. Измельченный материал удаляется через разгрузочный конус. Достоинства: простота конструкции и компактность, высокая производительность и степень измельчения, надежность в работе. Недостатки: повышенное изнашивание консольно закрепленных пальцев, большое пылеобразование, значительный расход энергии;
- *барабанные мельницы* — являются одними из самых распространенных машин, которые могут использоваться для грубого, среднего, тонкого и сверхтонкого измельчения. По принципу действия они относятся к машинам ударно-истирающего действия и по способу возбуждения движения мелющих тел подразделяются на мельницы с вращающимся барабаном, вибрационные и центробежные. Вращающаяся барабанная мельница (рис. 2.16) представляет собой

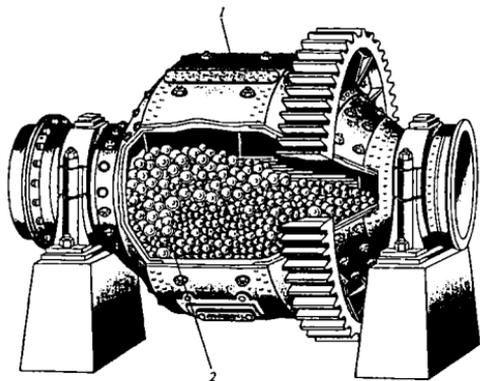


Рис. 2.16. Барабанная мельница: 1 — барабан; 2 — шары

вращающийся барабан 1, в который помещены дробящие тела (шары) 2 и измельчаемый материал.

При вращении барабана шары и материал под воздействием трения и центробежной силы поднимаются до некоторой высоты, а затем падают и скатываются в низ. Измельчение материала при этом происходит как от удара падающих шаров, так и от истирания между шарами и внутренней поверхностью мельницы. Эти мельницы могут работать как периодически, так и непрерывно. Шаровые мельницы отличаются универсальностью, постоянством степени измельчения в течение длительного периода работы, надежностью, безопасностью и простотой обслуживания. Недостатки: громоздкость и большой вес, низкий КПД, изнашивание мелющих тел (шаров) и загрязнение материала продуктами изнашивания, шум во время работы;

- *коллоидные измельчители*. Они обеспечивают величину измельчаемого продукта менее микрона. Измельчение осуществляется чаще всего мокрым способом. Основными частями коллоидного измельчителя являются корпус с коническим гнездом и ротор. Между конической поверхностью корпуса и поверхностью ротора устанавливается зазор для подачи суспензии, равный долям миллиметра, в котором твердые частицы измельчаются истиранием.

Механохимическая активизация. Исследования процессов в мельницах показали, что измельченные материалы аккумулируют значительно большую энергию, чем та, что идет на образование новой поверхности. Они также позволили определить, что

твердые тела в зависимости от условий измельчения (интенсивности подвода энергии, свойств вещества, длительности процесса и т. д.) аккумулируют 8...30 % подведенной энергии. Эта энергия делает твердое тело химически столь активным, что становятся возможными химические превращения, которые были в иных условиях нереализуемы.

С помощью механической активации изменяется структура твердых тел, ускоряются процессы диффузии при пластических деформациях, образуются активные центры на новых поверхностях (как внешних, так и внутренних), возникают импульсы высоких локальных температур и давлений при продвижении трещин, эмиссия электронов высоких и средних энергий при образовании трещин и т. д.

Эти явления наиболее интенсивны в процессе деформации твердых тел, особенно при высокой скорости подвода к ним энергии. Проведенные исследования показали, что накопленную энергию можно использовать для интенсификации следующих процессов с участием активированной твердой фазы:

- существенного повышения реакционной способности твердых тел;
- ускорения твердофазных и каталитических реакций, реакций в полимерных системах;
- повышения скоростей диффузии, тепло- и массообмена при реализации комбинированных процессов в системах газ—твердое тело, жидкость—твердое тело;
- увеличения растворимости, т. е. скоростей растворения, и сублимации твердых тел.

Контрольные вопросы

1. Какова основная цель процесса измельчения?
2. Какие существуют основные способы измельчения?
3. Какие устройства используются для осуществления процесса измельчения?
4. В чем заключается сущность механохимической активации?

2.5.2. Классификация твердых материалов

Скорость проведения процессов и длительность их осуществления с присутствием твердой фазы (измельчение, растворение, адсорбция, сушка, химическая реакция и т. д.) определяются

размером частиц, находящихся в обрабатываемой среде. Поэтому для осуществления таких процессов стараются использовать частицы близкого размера, которые получают чаще всего классификацией исходного сырья.

Классификация — процесс разделения сыпучего материала на части (фракции, классы) с различным размером содержащихся в них кусков и частиц.

Основные способы классификации:

- *грохочение (механическая классификация)* — рассев сыпучих материалов на ситах, решетках или других устройствах;
- *гидравлическая классификация* — разделение смеси твердых частиц на фракции, основанное на их различной скорости осаждения в жидкости;
- *воздушное (пневматическое) сепарирование* — разделение твердых частиц на фракции, основанное на их различной скорости осаждения в воздухе.

Размер твердых частиц характеризуется их гранулометрическим составом, который выражается либо в виде таблиц, либо графически в виде интегральной (суммарной) или дифференциальной кривой. Интегральная кривая изображает суммарное процентное содержание всех фракций. Дифференциальная кривая показывает процентное содержание отдельных фракций в материале.

Для гранулометрического анализа твердых веществ на практике применяют следующие методы:

- *ситовый метод*, при этом методе навеска материала просеивается через набор сит с постепенно уменьшающимися размерами отверстий. Сита характеризуются номером, который соответствует размеру отверстия в миллиметрах в соответствии со стандартом. При выборе размеров отверстий последовательных сит принимается постоянство отношения размеров отверстий смежных сит;
- *микроскопический анализ* заключается в замере под микроскопом с измерительной шкалой частиц пробы. Этот анализ дает не массовые проценты фракций, а процентное число частиц в них. В оптическом микроскопе можно измерить размеры частиц не менее 0,4 мкм, при применении ультрафиолетового света — не менее 0,1 мкм, а электронный микроскоп позволяет видеть частицы размером не менее 0,001 мкм;

- *седиментационный анализ* заключается в отстаивании суспензированной пробы материала в инертной жидкости, при этом наблюдается количество осевшего материала за определенные интервалы времени. (Седиментация — оседание мелких твердых частиц в жидкости и газе под воздействием силы тяжести или центробежных сил);
- *гидравлической классификации*, выполняемой в восходящем потоке жидкости (воды). При скорости потока, большей скорости осаждения частиц заданного размера, фракция, состоящая из более мелких частиц уносится с потоком. При последующем увеличении скорости восходящего потока могут быть отделены все более крупные фракции;
- *воздушной классификации*, проводимой в восходящем потоке газа (воздуха).

Грохочение осуществляется на специальных рассеивающих устройствах (грохотах), к ним относятся:

- *сита*, изготавливаемые с квадратными или прямоугольными отверстиями. В зависимости от их размера различают рассев: грубый (десятки миллиметров), средний (миллиметры), тонкий (десятые доли миллиметров);
- *колосники*, представляющие собой стержни, чаще всего трапецеидального сечения. Такая форма препятствует забиванию отверстий, расширяющихся книзу;
- *решета*, изготавливаемые из металлических листов, в которых штампуют круглые или продолговатые отверстия.

Работа грохотов оценивается по двум показателям:

- *эффективность грохочения* — отношение веса просеянного (нижнего) продукта к общему весу твердого материала того же размера в исходном материале;
- *производительность грохота* — весовое количество материала, получаемого с 1 м^2 поверхности сита.

Грохочение осуществляется непрерывно и периодически. Наибольшее распространение получило многократное грохочение, осуществляемое следующими способами:

- от мелкого к крупному — через сита, расположенные в одной плоскости, размеры отверстий которых увеличиваются от каждого предыдущего сита к последующему. Достоинства — удобство обслуживания, ремонта и смены сит, небольшая высота грохота, удобство распределения отдельных фракций продукта по сборникам. Недостатки — невы-

сокое качество грохочения, перегрузка и повышенное изнашивание мелких сит, значительная длина грохота;

- от крупного к мелкому — через сита, расположенные один над другим, размеры отверстий которых уменьшаются от верхнего сита к нижнему. Достоинства — лучшее грохочение вследствие отсева в первую очередь наиболее крупных кусков, меньшее изнашивание сит. Недостатки — сложность ремонта и смены сит, большая высота грохота, неудобный отвод готового продукта;
- комбинированный способ позволяет значительно преодолеть недостатки двух вышеназванных способов грохочения.

Типы грохотов зависят от формы рабочей поверхности. Их принцип действия основан на просеивании сыпучего материала при его движении вдоль рабочей поверхности грохотов. Различают плоские и барабанные (цилиндрические) грохоты. Плоские грохоты по конструкции рабочей поверхности разделяют на решетчатые, ситовые, колосниковые и валковые. Для предварительного грохочения (отделение мелочи от больших кусков) используют неподвижные грохоты, рабочая поверхность которых установлена с углом наклона $30...50^\circ$. Значительная интенсификация и повышение эффективности процесса грохочения достигаются путем придания рабочей поверхности грохотов колебательного движения.

Ситовые грохоты по устройствам привода подразделяют на следующие виды:

- *качающийся грохот* представляет собой прямоугольный короб с ситом, установленный на пружинящих опорах, которому сообщаются качания от эксцентрикового механизма. Эти грохоты применяют для классификации сухим и мокрым способом твердых материалов с размером кусков не более 50 мм. Достоинства — большая производительность, чем у колосниковых и барабанных грохотов, высокая эффективность грохочения, компактность, удобство обслуживания и ремонта. Недостатки — неуравновешенность конструкции, в результате работа их сопровождается сотрясениями и толчками;
- *гирационный грохот* представляет собой короб с одним или двумя ситами, совершающий круговые движения в вертикальной плоскости с помощью эксцентрикового вала. Спокойная работа вследствие уравновешенности конструкции,

высокая производительность и эффективность грохочения — это основные достоинства гирационного метода;

- *вибрационный грохот* состоит из плоского и обычно наклонного сита, совершающего с помощью вибратора 900...1500 колебаний в минуту с амплитудой 0,5...12 мм. Преимущества — отсутствие забивки материалом отверстий сит при любых режимах работы; более высокая производительность и эффективность грохочения, чем у грохотов других типов; пригодность для грохочения влажных материалов; компактность; относительная легкость регулирования и простота смены сит; меньший, чем у других грохотов, расход энергии;
- *барабанный грохот* представляет собой барабан цилиндрической, конической или многогранной формы, выполненный из сетки или перфорированных стальных листов. При вращении барабана с помощью приводного механизма с окружной скоростью 0,6...1,25 м/с материал, поступающий через патрубок, перемещается вдоль его поверхности, причем размер отверстий чаще всего уменьшается по ходу движения материала. *Многогранные грохоты (бурты)* применяются для сравнительно тонкого грохочения. В них возможна быстрая смена сит, установленных на каждой грани. Достоинства барабанных грохотов: простота конструкции и обслуживания; хорошее качество классификации. Недостатки: высокая металлоемкость; низкая удельная производительность с единицы поверхности сита; легко забиваются.

Гидравлическая классификация. Она происходит в движущихся потоках капельной жидкости (восходящем, горизонтальном, вращающемся и т. п.), скорость которых подбирается таким образом, чтобы частицы меньше определенного размера уносились в слив, а большего — оставались в классификаторе. В отличие от грохочения гидравлическая классификация применяется для разделения мелких материалов (0,05...5 мм и менее). Основные типы гидравлических классификаторов: многосекционные; конические; спиральные или шнековые; реечные и реечно-чашечные, или грибовые; центробежные.

Спиральный классификатор представляет собой установленное под углом 12...18° корыто, внутри которого со скоростью 2,5...17 об/мин вращаются одна или несколько спиралей, погруженные в суспензию и перемещающие ее вместе с крупными частицами в верхнюю часть корыта. Суспензия с более мелкими

частицами удаляется из нижней части классификатора через порог. Эффективность классификации зависит от угла наклона корыта, числа оборотов спиралей, концентрации твердого материала в суспензии.

В *речных классификаторах* перемещение суспензии вдоль наклонного корыта осуществляется рамами со скребками, совершающими возвратно-поступательное движение. Число качаний рам с грибками составляет 14...28 в минуту. Они имеют несколько меньшую удельную производительность и более сложную конструкцию по сравнению со спиральными классификаторами. Спиральные и речные классификаторы часто работают в замкнутом цикле с измельчителями.

Высокую производительность и эффективность, особенно при обработке мелких частиц, обеспечивают центробежные классификаторы, в качестве которых используются гидроциклоны и отстойные центрифуги со шнековой выгрузкой.

Воздушная классификация. Она отличается от гидравлической тем, что скорость осаждения частиц в воздухе значительно выше, чем в воде. Поэтому воздушная сепарация осуществляется обычно в восходящем воздушном потоке.

Сепараторы делятся на два вида:

- *воздушно-проходные* (рис. 2.17, а), в которых поток воздуха с твердым материалом поступает по патрубку 1 со скоростью 15...20 м/с, омывает отбойный конус 2, проходит по кольцевому пространству между корпусом 3 и внутренним конусом 4 и затем через тангенциально установленные лопатки завихрителя 5.

Выделение крупных твердых частиц из исходной смеси происходит сначала в кольцевом пространстве между корпусом 3 и конусом 4 под действием силы тяжести вследствие резкого снижения скорости воздушного потока в этом пространстве (до 4...6 м/с). Дальнейшая сепарация осуществляется под действием центробежных сил, возникающих при закручивании потока в лопатках завихрителя 5. При этом крупные частицы отбрасываются на внутреннюю стенку конуса 4, попадают на отбойный конус 2 и удаляются через патрубок 7, предварительно подвергаясь дополнительному разделению в воздушном потоке кольцевого пространства. Такая фракция вместе с воздухом отводится через патрубок 6.

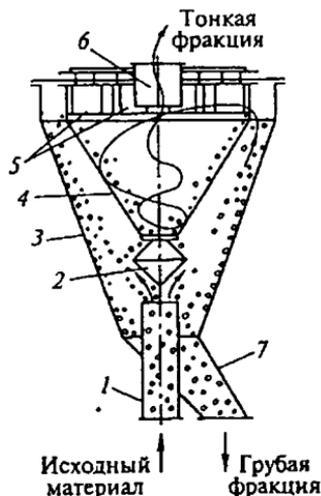


Рис. 2.17. Схема воздушно-проходного сепаратора: 1, 6, 7 — патрубки; 2 — отбойный конус; 3 — корпус; 4 — внутренний конус; 5 — лопатки завихрителя

Сепараторы этого типа позволяют разделять материал по граничному составу 150...200 мкм. Эффективность разделения можно регулировать изменением скорости воздуха и положения лопаток завихрителя;

- *воздушно-циркуляционные* (рис. 2.18), позволяющие осуществлять более тонкое разделение (по границе 30...60 мкм), отличаются от воздушно-проходных тем, что воздушный поток циркулирует внутри аппарата и не выводится наружу.

Разделяемый материал по патрубку 1 поступает на вращающийся диск 2. Крупные частицы отбрасываются центробежной силой к стенке конуса 3, опускаются по ней и удаляются через патрубок 4. На валу 10 тарелки укреплено вентиляторное колесо 9, создающее поток воздуха, циркуляция которого показана на рисунке стрелками. Циркулирующий пылевоздушный поток, проходя между лопатками завихрителя 8, под действием центробежных сил дополнительно освобождаются от крупных частиц, которые по внутренней поверхности конуса 7 отводятся к патрубку 4. В корпусе 6 аппарата улавливаются частицы мелкой фракции, которые удаляются через патрубок 5. Процесс выделения мелкой фракции в корпусе 6 аналогичен выделению пыли в циклонах. Центробежное ускорение потоку в корпусе 6 сообщает вентиляторное колесо 9. Воздушно-цирку-

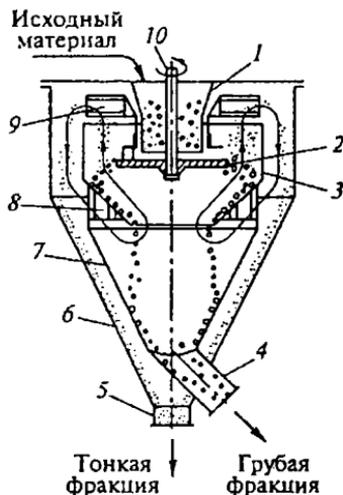


Рис. 2.18. Схема воздушно-циркуляционного сепаратора: 1, 4, 5 — патрубки; 2 — диск; 3, 7 — конусы; 6 — корпус; 8 — лопатки завихрителя; 9 — вентиляторное колесо; 10 — вал

ляционные сепараторы по сравнению с воздушно-проходными более компактны и требуют меньших затрат энергии, они выполняют одновременно функции классификатора, вентилятора и циклона.

2.5.3. Дозирование

Для осуществления технологических процессов часто необходима регулярная и равномерная подача зернистых материалов в аппараты. Для этой цели применяют порционные или непрерывно действующие механические устройства — *дозаторы* или *питатели*, которые могут регулировать как объем, так и вес подаваемого материала. Основные виды дозаторов:

- *шнековый (винтовой) питатель* представляет собой шнековый транспортер, соединенный с бункером, из которого выгружается материал. Подача материала определяется скоростью вращения шнека. Недостаток этого вида питателя: истирание материала, невозможность перемещения налипавшего материала;
- *баранный (секторный) питатель* состоит из кожуха, в котором вращается барабан с перегородками. Подача мате-

риала регулируется изменением частоты вращения барабана. Достоинства: малый расход энергии и компактность. Недостатки такие же, как и у шнековых питателей;

- *тарельчатый питатель* представляет собой медленно вращающийся вокруг вертикальной оси горизонтальный диск (тарелку), который расположен под бункером на массивной поддерживающей опоре. Материал попадает на вращающуюся тарелку через «манжету» и располагается на тарелке в виде усеченного конуса под углом естественного откоса. При вращении тарелки часть материала набегает на скребок, скользит по нему и сталкивается в приемную камеру. Изменение подачи в широких пределах достигается изменением объема материала на тарелке соответствующей установкой (вертикальным перемещением) «манжеты». В небольших интервалах изменение подачи достигается различной установкой скребка, осуществляемой винтом.

Тарельчатый питатель конструктивно прост и надежен в работе. Его недостаток — неточность дозировки как результат изменения угла естественного откоса даже при незначительных изменениях фракционного состава, влажности, условий слеживаемости материала в бункере;

- *весовые дозаторы* включают устройства для взвешивания материала и для автоматического поддержания заданной подачи. Взвешивание обычно производится на ленточных весах (рис. 2.19). На ленточном транспаранте δ между двумя опорами ленты расположен весовой рычаг 3 , шарнирно укрепленный на стойке 2 . Этот участок ленты является весовой платформой. На одном плече рычага смонтирован

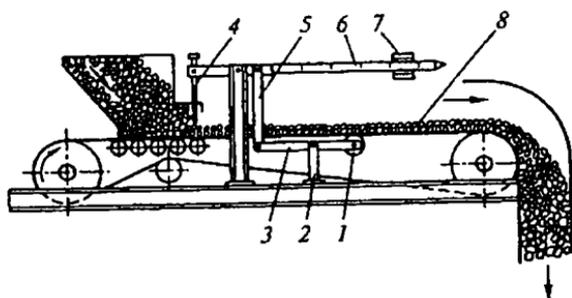


Рис. 2.19. Схема весового ленточного питателя: 1 — ролик; 2 — стойка; 3 — рычаг; 4 — шиббер; 5 — тяга; 6 — коромысло; 7 — гиря; 8 — ленточный транспортер

весовой ролик 1, на который действуют вес ленты транспортера и материала, находящегося на весовой платформе. Второе плечо рычага тягой 5 соединено с коромыслом 6. Находящийся на весовой платформе материал уравнивается передвигающейся по коромыслу гирей 7 в соответствии с требуемой подачей материала. Для обеспечения постоянства заданной подачи коромысло должно быть соединено с регулятором подачи того или иного питателя.

Если коромысло весов связано с шибером 4 питающей воронки этого же транспортера непосредственно или с помощью передаточного механизма и мотора, то получается ленточный весовой дозатор. При подаче питателем материала, превышающего по весу заданную подачу, коромысло 6 изменит свое положение, что явится импульсом для изменения положения регулирующего шибера 4, который уменьшит подачу. При уменьшении подачи шибер откроется и увеличит слой материала на ленте.

2.5.4. Смешение

Смешение твердых материалов осуществляется для получения однородной смеси из отдельных сыпучих компонентов.

Процесс смешения осуществляют в смесителях, которые можно классифицировать по следующим признакам:

- по организации процесса смешения во времени — периодического и непрерывного действия;
- по механизму процесса смешения — циркуляционные, объемного и диффузионного смешения и др.;
- по конструктивным особенностям — барабанные, шнековые, ленточные, лопастные, плунжерные, планетарно-шнековые, спиральные и др.

Барабанный смеситель обычно состоит из цилиндрического корпуса, вращающегося на опорных роликах. Барабан снабжен внутренними спиральными ребрами и полками для эффективного смешения. Барабанные смесители это устройства периодического действия, загрузка и выгрузка материала осуществляется с помощью шнека. Эти смесители просты по устройству, но пригодны для смешения в основном сухих порошкообразных материалов и требуют значительного времени смешения.

Смесители с вращающимися лопастными рабочими органами применяют для смешения сухих твердых материалов, густых и вязких масс и паст. Как правило, такие смесители состоят из корпуса с двумя полуцилиндрическими днищами, в котором вращаются навстречу друг другу два горизонтальных вала с лопастями, перемешивающими материал. Отличие состоит в конфигурации лопастей вращающихся валов, учитывающей специфические свойства смешиваемых материалов.

Контрольные вопросы

1. Какова основная цель процесса классификации твердых материалов?
2. Какие существуют основные способы классификации?
3. Какие способы гранулометрического анализа существуют в технике?
4. Каковы принципы работы, основные типы и устройства грохотов?
5. Каковы принцип действия и устройство гидравлических и воздушных классификаторов?
6. Какие основные типы дозирующих устройств существуют?
7. Какие смешивающие устройства твердых материалов используются в промышленности?

2.5.5. Перемещение твердых материалов

На многих стадиях технологических процессов возникает необходимость в перемещении твердых материалов. Перемещение осуществляется подъемно-транспортными устройствами или сооружениями. Эти устройства можно классифицировать по различным признакам:

- по организации процесса (непрерывный и периодический транспорт);
- по направлению перемещения транспортируемого материала (горизонтальное или слабо наклонное, вертикальное или круто наклонное, смешанное или пространственное);
- по роду перемешиваемого материала (сыпучие материалы и штучные грузы).

К сыпучим материалам относятся порошкообразные и кусковые материалы, перемещаемые навалом. К штучным грузам — изделия, имеющие определенную форму, а также материалы, упакованные в тару.

По конструктивным особенностям для различных случаев транспортировки твердых материалов применяют следующие подъемно-транспортные устройства:

- для горизонтального перемещения — транспортеры ленточные, пластинчатые, скребковые, винтовые, вибрационные, пневматические транспортные желоба;
- для вертикального перемещения — элеваторы;
- для смешанного перемещения — транспортеры с погружными скребками, устройства пневматического и гидравлического транспорта.

Ленточный транспортер — это лента с соединенными концами, натянутая на двух барабанах, которая перемещается со скоростью 0,5...2,5 м/с для сыпучих и 0,75...1,5 м/с для штучных грузов. Один барабан — приводной, другой — натяжной с грузовым или винтовым натяжным приспособлением. Для предупреждения провисания ленты под ней устанавливают опорные ролики. Загрузочная воронка имеет направляющий лоток с боковыми стенками для предотвращения разброса материала и заднюю наклонную стенку, принимающую на себя удары и давление подаваемого материала. Разгрузка транспортера осуществляется либо сбросом материала при огибании лентой приводного барабана, либо удалением с помощью ножей или скребков (промежуточная).

Достоинства ленточных транспортеров: малый расход энергии, высокая производительность, способность перемещать влажный, налипающий и штучный материал, возможность перемещения материала на значительные расстояния. Недостаток — трудность герметизации транспортируемого материала.

Скребковый транспортер (рис. 2.20) состоит из неподвижного желоба 1, в котором со скоростью 0,25...0,75 м/с движется замкнутая цепь 2 со скребками 3. Движение цепи осуществляется при помощи приводной звездочки 6, противоположная звездочка 8 является натяжной. На шарнирах цепи укреплены ролики 4, которые катятся по направляющим 7.

Недостатки — высокий расход энергии, большое изнашивание движущихся частей, возможность разрушения транспортируемых хрупких материалов из-за истирания.

Загрузка материала осуществляется через лоток 9. Скребки при движении цепи захватывают и перемещают по желобу на расстояние до 150 м материал, который разгружается либо с другого конца желоба, либо через разгрузочное отверстие 5.

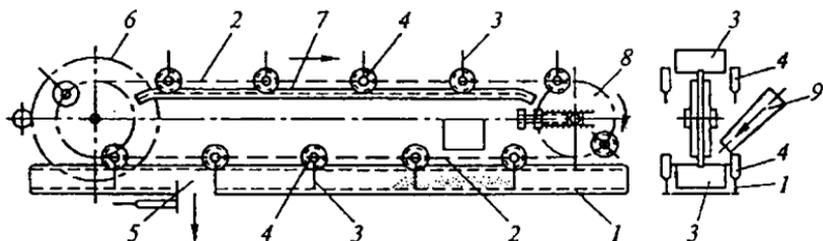


Рис. 2.20. Схема скребкового транспортера: 1 — неподвижный желоб; 2 — цепь; 3 — скребок; 4 — ролик; 5 — разгрузочное отверстие; 6 — приводная звездочка; 7 — направляющие; 8 — натяжная звездочка; 9 — лоток

Достоинства скребкового транспортера (по сравнению с ленточным) — простота и дешевизна устройства, удобство загрузки и разгрузки материала, большой угол наклона перемещаемого материала (до 45°).

Винтовой транспортер, или *шнек*, предназначен для перемещения материала под углом до 20° к горизонту и состоит из закрытого желоба, в котором вращается шнек. Транспортируемый материал поступает в желоб через загрузочное отверстие, захватывается вращающимся шнеком, перемещается вдоль устройства на расстояние до 40 м и выгружается через отверстие. Однако загрузка и выгрузка могут быть осуществлены в любой точке по длине желоба.

Достоинства винтового транспортера: простота, компактность, дешевизна, герметичность, позволяющая использовать его при перемещении токсичных и пылящих материалов.

Недостатки: достаточно высокий расход энергии, значительное изнашивание стенок желоба и поверхности винта, истирание перемещаемого материала.

Элеватор предназначен для вертикального перемещения сыпучих материалов и состоит из кожуха, предохраняющего окружающую среду от транспортируемых пылящих материалов, в нижней части которого находится башмак, а в верхней — головка. В головке установлен приводной барабан или звездочка, а в башмаке — натяжной. На них натянута лента (или цепь), к которой прикреплены ковши. Натяжение ленты регулируется винтовым устройством. Материал из приемного бункера поднимается ковшами, из которых высыпается в верхней части транспортера при огибании приводного барабана в разгрузочное устройство.

Достоинства элеватора: плавность хода и относительно высокая скорость (скорость перемещения быстроходных элеваторов — 0,9...1,5 м/с, тихоходных — 0,4...0,6 м/с), возможность подъема больших грузов на высоту 40 м и выше.

Пневматические подъемники (аэролифты) (рис. 2.21), применяются для подъема зернистых материалов на высоту до 30 м.

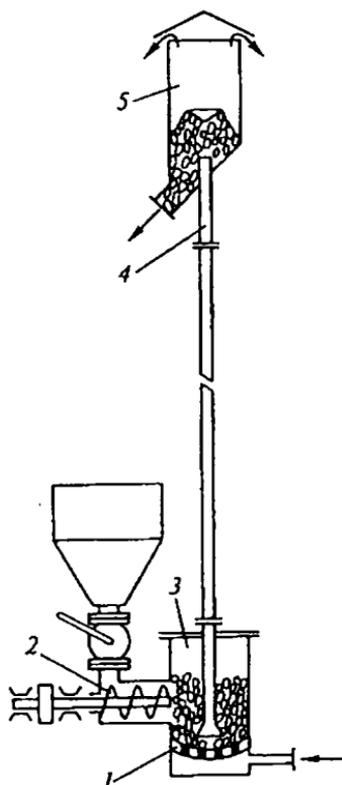


Рис. 2.21. Схема пневматического подъемника (аэролифта): 1 — перфорированная перегородка; 2 — питатель; 3 — аэрокамера; 4 — транспортирующий трубопровод; 5 — сепаратор

Твердые частицы подаются питателем 2 в аэрокамеру 3 с перфорированной перегородкой 1. Сжатый воздух подается под перегородку, увлекает зернистый материал и поступает вместе с ним в транспортирующий трубопровод 4. В сепараторе 5 материал отделяется от воздуха и поступает для дальнейшей переработки.

Для транспортировки мелкозернистых материалов в горизонтальном направлении (с небольшим уклоном вниз) применяют *пневматические транспортирующие желоба*. В таких конструкциях через сыпучий материал, находящийся на пористом днище желоба, продувается воздух, в результате материал приобретает текучесть. Если днище имеет небольшой уклон ($3...6^\circ$), то материал будет перемещаться в сторону уклона. Этот вид транспорта удобен для транспортировки и одновременного охлаждения сыпучего материала. Таким образом, материал может перемещаться на расстояния до 1 км со скоростью 0,5...2, м/с.

Достоинства пневмотранспорта — герметичность транспортировки, гибкость коммуникаций, возможность автоматизации процесса, небольшая стоимость строительства и эксплуатации.

Гидротранспорт применяют для перемещения зернистых материалов в струе воды. Его достоинством является высокая скорость транспортирования больших масс материалов. Недостатки: относительно высокий расход воды, а также необходимость использования специальных устройств, отделяющих твердый материал. Кроме того, этот метод применим только для зернистых материалов, не растворимых в воде и не боящихся контакта с ней.

Контрольные вопросы

1. По каким принципам классифицируются подъемно-транспортные устройства?
2. Какие устройства для перемещения твердых материалов используются в промышленности?

Раздел 3

ТЕХНОЛОГИИ ПО ВИДАМ ПРОИЗВОДСТВА

3.1. Металловедение и металлообработка

Металлы относятся к числу наиболее используемых компонентов для создания конструкционных материалов, они играют существенную роль в создании машин, аппаратов, сооружений, предметов быта и т. д. При этом металлы в основном используются как основа сплавов или как легирующие добавки и значительно реже в чистом виде. Особенно большое значение имеют такие свойства металлических материалов, как прочность, пластичность, сопротивление усталости, износу, коррозии и т. д., что связано с их атомно-кристаллическим строением, которое в конечном итоге определяется особенностями межатомных связей и энергетическим состоянием электронов, осуществляющих эту связь. Известно, что ряд свойств определяется не только их положением в периодической системе и атомно-кристаллическим строением, но и дефектами кристаллического строения.

Металловедческие исследования последних лет показали, что повышение скорости кристаллизации является эффективным средством воздействия на структуру металлов, сплавов и твердых тел вообще. В связи с тем, что высокие скорости охлаждения могут быть достигнуты только при отводе теплоты от масс расплавленного металла, разработаны новые принципы затвердевания в виде гранул (10...5000 мкм).

Большой прогресс намечился в области металлообработки-вающей промышленности (на смену традиционным металлорежущим станкам пришли высокопроизводительные и быстро переналаживаемые станки с программным управлением и обрабатывающие центры).

Наряду с традиционными методами получения чугуна и стали (доменный, мартеновский и др.) в последнее время в специальной металлургии внедряются прогрессивные методы плавки, литья, такие как электроплавка стали и др. металлов, электрошлаковый переплав, вакуумно-дуговая и электронно-лучевая плавка, вакуумное рафинирование, непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. Большое значение придается атомной и космической металлургии.

Развитие ряда современных отраслей техники требует создания не только новых конструкционных материалов (высокопрочных, коррозионно стойких, износостойких и др.), но и принципиально новых методов обработки.

Фундаментальные исследования в области защиты металлов от коррозии привели к разработке ряда технологий: нанесение двухслойных металлокерамических покрытий, механо-ультразвуковая, химико-термическая обработки и др. Все это приводит к существенному улучшению свойств поверхности материалов.

Большой интерес представляют исследования, направленные на получение различных металлических материалов путем испарения и конденсации в вакууме в виде фольги или заготовок определенной формы, что представляется весьма перспективным для получения различных изделий, изготовленных из порошковых материалов и др.

3.2. Проектирование литых заготовок

3.2.1. Общие сведения

Применение литых заготовок обеспечивает рациональное использование металла и снижение массы изделий путем разработки рациональной конструкции детали, применения литейных сплавов с высокими физико-механическими свойствами. По сравнению с другими методами получения заготовок литье обладает рядом преимуществ: возможно изготовление заготовок всевозможных габаритов и массы; получение заготовок из сплавов, не подлежащих пластической деформации и трудно обрабатываемых резанием. Современный уровень литейного производства позволяет получать литьем ответственные детали машин, магниты.

Способ получения литых заготовок зависит от их размеров, степени сложности и марки литейного материала, но неизменны этапы литейного производства: получение жидкого сплава требуемого состава и заливка его в заранее подготовленную форму.

В литейном производстве существуют следующие способы изготовления отливок:

- литье в песчано-глинистые формы с ручной (по шаблону, в опоках, в объемных опоках из быстротвердеющих смесей, в почве и в стержнях) и машинной формовкой в опоках;
- литье в оболочковые формы (песчано-смоляные, химически твердеющие, по выплавляемым, растворяемым, замораживаемым и газифицированным моделям);
- литье в многократные формы (гипсовые, песчано-цементные, кирпичные и др.);
- литье в кокиль;
- литье под давлением;
- центробежное литье на машинах;
- штамповка жидких сплавов;
- литье выжиманием;
- непрерывное литье.

Различными методами литья могут быть получены изделия массой от десятых долей грамма до сотен тонн и размерами от нескольких миллиметров до десятков метров с толщиной стенок от 0,5 мм до нескольких сотен миллиметров. При этом отливки могут быть с очень сложной конфигурацией наружных поверхностей и внутренних полостей.

Процесс литейного производства включает изготовление моделей и стержневых ящиков, изготовление форм и стержней, плавку и доводку металла, сборку литейных форм и заполнение их металлом, выбивку, обрубку и очистку отливок, контроль качества отливок, исправление брака и окраску.

Литая заготовка получается путем заливки расплавленного металла во внутреннюю полость литейной формы, которая по конфигурации соответствует изготавливаемой детали. Литейная форма заливается металлом через каналы, называемые литниковой системой. Заполнение формы металлом может быть свободным (под действием силы тяжести металла) или принудительным (под действием центробежных сил, вакуума или внешнего давления).

Металл, заполнив внутреннюю полость формы, кристаллизуется в ней и образует литую заготовку. Наружные очертания от-

ливки образуются стенками полости формы, а внутренние полости, отверстия, пустоты, каналы и сложные поверхности — с помощью вставок в литейные формы, называемых стержнями.

Кристаллизация (переход металла из жидкого состояния в кристаллическое — твердое) жидкого металла начинается при понижении температуры расплава до определенного значения. Температура кристаллизации зависит от чистоты расплава и ряда внешних факторов. Например, скорости отвода тепла, давления, влияния магнитного или ультразвукового полей.

Расплавленный металл в соответствии с законом термодинамики, как любая система, стремится перейти в наиболее стабильное состояние с наименьшей свободной энергией, т. е. в кристаллическое состояние.

Как известно, кристаллическое состояние характеризуется строго упорядоченной системой расположения атомов, а жидкое, наоборот, отсутствием строгого взаимного расположения.

Процесс кристаллизации начинается от стенок литейной формы или изложницы. В результате интенсивного и направленного отвода теплоты около стенок формы образуется вначале слой мелких кристаллов (образуется корка), а затем разветвленные древовидные кристаллы (дендриты), которые растут в направлении, противоположном отводу теплоты.

Стержни устанавливают внутри формы в процессе ее сборки перед заполнением металлом, а затем после его кристаллизации их извлекают из отливки. Стержни и литейные формы могут быть разовыми, выдерживающими однократное заполнение металлом (такие формы изготавливают на основе песчаных формовочных смесей), многократными (постоянными), выдерживающими многократное заполнение металлом (эти формы изготавливают из металла или огнеупорного материала).

Литое изделие может быть заготовкой, требующей механической обработки перед сборкой, или деталью, поступающей на сборку без предварительной механической обработки.

Изготовление форм и стержней в общей трудоемкости производства литых заготовок составляет 50...60 %. В настоящее время доля литья, полученного с применением машинной формовки, составляет примерно 74 %, на автоматических линиях — 8 %, ручным способом — 18 %.

Современное машиностроение и приборостроение требуют изготовления отливок разного назначения, различной степени сложности, размеров и из различных металлов и сплавов. В свя-

зи с этим в промышленности получило распространение большое количество разнообразных процессов, каждый из которых отличается своими техническими и экономическими возможностями. Все способы получения литых заготовок можно разделить на три группы.

К первой группе относится изготовление отливок в разовых формах, выдерживающих однократное заполнение металлом. Это литье в сухие и сырые песчаные формы, по выплавляемым моделям, по газифицируемым (выжигаемым) моделям и др.

Ко второй группе относится изготовление отливок в многократных формах, выдерживающих многократное заполнение металлом. Это литье центробежным способом, в кокиль, под давлением, выжиманием, непрерывное литье и др.

К третьей группе относится изготовление отливок в комбинированных и полупостоянных формах, изготавливаемых из металла со сменными песчаными стержнями или из огнеупорных материалов. К этому виду относятся литье в облицованный кокиль, литье в кокиль со сменными стержнями, центробежное литье в футерованную изложницу или со стержневой вставкой и др.

Область применения перечисленных способов получения литых заготовок определяется объемом и характером производства, требованиями к отливкам по точности и шероховатости поверхности, технологическими особенностями и физико-химическими свойствами применяемых литейных сплавов, требованиями к качеству отливок, исходя из экономической целесообразности применения того или иного способа для каждого конкретного случая и возможностей производства.

Классификация способов литья по стойкости форм достаточно полно отражает существо явлений, происходящих при взаимодействии металла и формы. Взаимодействие металла и формы (тепловой и газовый обмен, условия кристаллизации сплава в форме, условия для заполнения формы металлом и ряд других) имеет решающее значение для формирования структуры и поверхности отливки, а следовательно — их физических и эксплуатационных свойств.

В процессе кристаллизации металл охлаждается в форме неравномерно, что способствует непрерывному движению жидкости внутри отливки, т. е. идет конвективное перемещение расплава. Как правило, кристаллизация начинается в периферийных слоях отливки, и жидкость перемещается к периферии, компенсируя недостаток строительного материала для кристал-

ла. Центральная часть кристаллизуется последней, и жидкого металла на строительство кристаллов может не хватить, что приведет к образованию пустот внутри толстых частей отливок: раковин, пор и т. п.

Литейные свойства сплава влияют на качество отливок. Такие дефекты отливок, как усадочные и газовые раковины, пористость, горячие и холодные трещины, коробление, недоливы и другие появляются в результате большой газонасыщенности (газонасыщение — содержание газов O_2 , H_2 , N_2 в металле, которые ограниченно растворяются в нем), повышенной усадки и жидкотекучести (жидкотекучесть — способность металла заполнять литейную форму и воспроизводить очертания ее внутренней полости).

Контрольные вопросы

1. Что обеспечивает применение литых заготовок?
2. Какие способы получения литых заготовок существуют?
3. Каково назначение стержней и какие бывают формы?

3.2.2. Литейные сплавы, плавильные агрегаты

Наиболее широкое применение находят литейные сплавы на основе железа, меди, алюминия, магния, титана, цинка и свинца.

Сплавы должны иметь технологические особенности, которые определяют их пригодность для получения качественной отливки. Основные из них: жидкотекучесть, усадка, склонность к ликвации (ликвация — химическая и структурная неоднородность сплава в различных частях отливки), поглощение газов, температура плавления, склонность к внутренним напряжениям и трещинообразованию. Кроме того, они должны быть технологичными, не дефицитными и дешевыми, а также обеспечивать в отливках заданные физические, механические и химические свойства.

Примерно 80 % отливок по массе изготавливают из серого чугуна, 15 % — из стали, 5 % — из сплавов цветных металлов, среди которых большая часть на основе алюминия.

В литейных цехах применяют разнообразные технологические варианты плавки и подготовки сплавов к заливке в формы.

Используют отдельные агрегаты (вагранки, электропечи, марте-новские печи), спаренные (работающие последовательно: вагранка — электропечь, вагранка — конвертор, электропечь — электропечь) и комбинированные (индукционно-дуговые, индукционные печи с несколькими диапазонами частот). От процесса плавки и используемых плавильных агрегатов с их специфическими особенностями в значительной мере зависит качество отливок, связанное с усадкой металла, его газонасыщенностью, температурой и точностью химического состава.

При выборе плавильных агрегатов и технологии плавки учитывают характер производства, структуру цеха, номенклатуру отливок, но всегда должны быть выполнены основные требования: обеспечение производства достаточным количеством жидкого металла; соблюдение заданного химического состава сплава в требуемых пределах; соблюдение температурного режима плавки.

Вагранка является наиболее распространенным плавильным агрегатом, применяемым в литейных цехах для плавки серого высокопрочного и ковкого чугуна. Вагранки отличаются простой конструкции, высокой производительностью и экономичностью. Их преимущество заключается в том, что они могут непрерывно, без остановки процесса плавки, выдавать жидкий чугун в течение всей смены. По конструкции они различны и постоянно совершенствуются.

Дуговые печи используют для получения чугуна и стали. В них недостаточен эффект перемешивания металла, что затрудняет получение однородного раствора по химическому составу во всей ванне. Для устранения этого недостатка применяют печи с электромагнитным перемешиванием расплава, что сокращает продолжительность плавки, повышает производительность печей, улучшает качество металла. Особенно эффективны электромагнитные перемешиватели при выплавке высоколегированной стали и чугуна.

В литейных цехах используют различные по конструкции индукционные электрические печи, работающие на различных частотах: 50, 150, 450, 1000, 2500 Гц. Индукционные печи используют для плавки черных и цветных сплавов. Металл, выплавленный в индукционной печи, обладает повышенной жидкотекучестью благодаря низкому содержанию газов, оксидов и других примесей.

Индукционные каналные печи допускают одновременное заполнение их металлом из разливочного ковша через верхнюю

воронку и выпуск металла через нижнюю. Их применяют при производстве чугунов, медных, алюминиевых, цинковых сплавов.

Мартеновские печи в литейных цехах используют для плавки сталей в больших объемах (30...200 т), а также для получения крупных отливок.

Кроме названных способов, существуют специальные способы плавки: электрошлаковая, вакуумно-дуговая, вакуумно-индукционная, плазменно-дуговая, электроннолучевая.

Установки для соответствующих способов плавки по конструкции аналогичны установкам, применяемым при вторичном переплаве стали. Для плавки цветных сплавов на основе алюминия, меди, магния и титана в литейных цехах используют разнообразные плавильные агрегаты.

Алюминиевые сплавы в зависимости от масштабов производства и специфики литейной технологии плавят в тигельных, отражательных, индукционных электропечах, а также в горновых тиглях, нагреваемых жидким или газообразным топливом.

Для плавки медных сплавов применяют дуговые однофазные электропечи с независимой дугой, индукционные электропечи с сердечником и без него, реже используют пламенные отражательные печи и тигли, обогреваемые в горнах, работающих на жидком и газообразном топливе.

Магниевые сплавы активно соединяются с кислородом, азотом, водородом, образуя соединения, которые отрицательно влияют на свойства сплавов. Для предохранения сплавов от насыщения газами используют покровные флюсы. Для очистки металла от различных включений его рафинируют разнообразными флюсами, а перед разливкой в формы для улучшения структуры и механических свойств модифицируют.

Рафинирование — очистка сплавов от газов, неметаллических включений и других вредных примесей.

Модификация — введение искусственных центров кристаллизации. Модификаторы (вещества, вводимые в металл, составляют 0,1...0,3 % массы жидкого металла) практически не изменяют химический состав металла, а механические свойства улучшают благодаря измельчению зерен металла и рафинированию сплава.

Титановые сплавы тугоплавки и активно взаимодействуют с азотом, водородом и кислородом, при этом их механические свойства резко ухудшаются, а хрупкость возрастает. Поэтому плавку титановых сплавов проводят в вакууме или в среде аргона. Для плавки титановых сплавов наиболее совершенны по

конструкции вакуумные дуговые электропечи с расходуемым электродом. Широкое применение нашли также индукционные высокочастотные печи, устанавливаемые в одном плавильно-заливочном агрегате с литейными формами, полученными по выплавляемым моделям или оболочковым способом.

Контрольные вопросы

1. Какими свойствами должны обладать сплавы для получения качественной отливки?
2. Какие основные виды плавильных агрегатов существуют?
3. Что такое рафинирование и модифицирование?

3.2.3. Подготовка сплавов к разливке в литейные формы

Перед заливкой в литейные формы расплав обычно обрабатывают, т. е. подготавливают к кристаллизации для получения отливок с требуемыми свойствами и высокого качества. Сплавы очищают от газов и примесей, вводят в них добавки для получения необходимой структуры после кристаллизации, а следовательно, и свойств. Наиболее распространенные виды подготовительной обработки сплавов — модифицирование, легирование, рафинирование, дегазация. Эти виды часто дополняют друг друга.

Модифицирование может осуществляться в виде твердых (мелко дробленых) добавок и путем смешивания растворов (жидкое модифицирование). В качестве модификаторов могут быть использованы тугоплавкие частицы, которые искусственно увеличивают число центров кристаллизации (зародышей) в расплаве; поверхностно-активные элементы, которые адсорбируются (адсорбция — это поглощение вещества из раствора или газа твердым телом) на гранях кристалла, сдерживая его рост путем изоляции от жидкости строительного материала; вещества, вступающие в химические реакции с элементами и газами, находящимися в расплаве, с образованием новых соединений, которые влияют на последующие процессы кристаллизации и изменяют физико-химическую природу сплавов. Модификаторы часто представляют собой комплексные соединения, состоящие из нескольких элементов и обладающие раскисляющей, дегазирующей и графитизирующей способностью.

Путем модифицирования можно повышать прочность и износостойкость сплава, улучшать обрабатываемость резанием, предупреждать образование отбела на поверхности и в тонких сечениях чугунных отливок, выравнивать структуру и твердость в толстых и тонких сечениях отливок. После модифицирования расплав сразу заливают в литейную форму во избежание потери эффекта модифицирования.

Чугун модифицируют для различных целей следующими добавками: ферросилицием, висмутом и бором, магнием, кальцием иттрием, церием. Алюминиевые сплавы модифицируют натрием и его хлористыми и фтористыми солями. Для модификации магниевых сплавов используют хлористое железо и углеродосодержащие вещества, такие как мел, мрамор.

Легирование — это изменение химического состава, внутреннего строения, а следовательно, и свойств сплава путем введения в него различных добавок в требуемых количествах в процессе плавки. При поверхностном легировании происходит диффузионное насыщение отливок.

Химические элементы, специально вводимые в сплав в различных количествах с целью изменения его строения, состава и свойств, называются легирующими добавками. Они изменяют строение сплава в результате образования новых структурных составляющих и фаз.

Легирование придает сплаву повышенную твердость, коррозионную стойкость, жаропрочность, износостойкость, окалиностойкость, немагнитность и т. д. Сплавы легируют, обычно используя несколько элементов, в этом случае они называются сложно легированными или комплексно легированными. Процент легирующих добавок может достигать десятков процентов.

Рафинирование, как уже говорилось выше, это очистка сплавов от газов, неметаллических включений и других вредных примесей. Для рафинирования применяют флюсы и покровные шлаки различного состава, вакуумирование расплава, продувку расплава инертными и некоторыми активными газами. Рафинированию чаще подвергают цветные сплавы на основе меди, магния, алюминия, цинка, так как они очень активно насыщаются газами.

Состав флюса для рафинирования магниевых сплавов таков, что плотность его больше, чем расплава. Флюс начинает опускаться, захватывает неметаллические включения и осаждает их на дно тигля. После осаждения включений на поверхность рас-

плава засыпают новый флюс для модифицирования и предотвращения насыщения расплава газами.

Алюминиевые сплавы всегда рафинируют (для очистки от водорода, оксидов и различного рода включений) продувкой аргоном, азотом или хлором, обработкой хлоридами ($MnCl_2$, $ZnCl_2$ и др.), флюсами, выдержкой в вакууме. Для защиты от насыщения газами при плавке медных сплавов применяют древесный уголь и флюсы (бура, сода, фториды, стекло, хлористый барий, поваренная соль). Для измельчения зерна в отливках из оловянных и алюминиевых бронз в расплав вводят ванадий, титан, бор, цирконий в количестве 0,15...0,2 % массы расплава.

Контрольные вопросы

1. Какие виды обработки применяют при подготовке сплава к разливке?
2. В чем заключаются модифицирование и легирование?
3. Какими материалами рафинируют и дегазируют сплавы?

3.2.4. Заливка литейных форм

Равномерность заполнения формы, температура металла, скорость заполнения влияют на формирование конечной структуры металла отливки, появление засорных, шлаковых и газовых раковин, величину усадки и склонность к появлению трещин, а также на точность отливки и шероховатость ее поверхности. Повышенная температура металла способствует хорошему заполнению всех сложных полостей формы, качественному питанию отливки, но в то же время приводит к взаимодействию металла и формы с образованием пригара на поверхности отливки.

Скорость заливки металла в форму влияет на тепловые потери металла. При быстром заполнении уменьшаются тепловые потери, а это способствует равномерному охлаждению и затвердеванию отливки с равномерной структурой и свойствами. Струя металла оказывает динамические нагрузки на стенки формы, величина которых зависит от скорости заливки и давления металла. Стенки формы и ее донная часть могут быть разрушены струей металла, вследствие чего форма может изменить свои размеры, что скажется на точности размеров и геометрии отливки.

Автоматические высокопроизводительные формовочные линии требуют применения автоматических устройств для заливки металла в формы. Для автоматической заливки литейных форм чугуном применяют наклоняющийся ковш вместимостью 1...4 т с индукционным подогревом расплава и поддержанием постоянной температуры.

Для синхронной работы заливочного участка и формовочных машин на конвейере устанавливают промежуточную литейную печь. Применение литейной печи повышает производительность конвейера, отпадает необходимость использования больших разливочных ковшей с ручным управлением. В качестве литейной печи для непосредственной заливки из нее металла в формы используют канальную индукционную печь, в которой происходит подогрев чугуна, выплавленного в вагранке. Печь устроена таким образом, что может одновременно заполняться чугуном через загрузочный канал и выпускать подогреваемый чугун в форму. Заливочный и выпускной каналы выходят в ванну печи около дна (сифонная система, что исключает попадание шлака в форму).

Вследствие значительной разницы площадей поперечного сечения ванны печи и выпускного канала сифонной системы небольшое изменение уровня металла в ванне приводит к значительному его смещению в выпускном канале, что позволяет точно регулировать процесс заливки формы. После снятия избыточного давления заливка формы прекращается.

Особую сложность в литейном производстве вызывает заливка формы сплавами, склонными к окислению. В этом случае плавка металла и заливка форм совмещаются в одном агрегате, работающем в вакууме или в среде инертных газов.

Для изготовления высококачественных крупногабаритных отливок методом центробежного литья используют вакуумные электродуговые плавильно-заливочные установки.

Прогрессивным является магнитодинамический процесс заливки литейных форм. В настоящее время используют магнитодинамические установки для безковшевой заливки форм и автоматического дозирования алюминиевых, цинковых сплавов и чугунов. При этом обеспечивается снижение потерь металла и улучшение его качества. Трудоемкость заливки форм снижается на 40 %, себестоимость — на 8 %, увеличивается выход годного литья чугуна на 3 %, цветных сплавов — на 7 %.

Для автоматизации процесса заливки литейных форм жидким металлом часто совмещают процесс плавки и транспортирования металла в одном агрегате. Примером может служить магнитодинамическая плавильно-заливочная установка для медных сплавов. Она может работать в комплексе с машиной для литья под давлением. Установка представляет собой канальную индукционную печь с горизонтальным каналом и двумя дополнительными электромагнитами для создания магнитных полей, которые при взаимодействии с индукционным током в плавильном канале создают объемные электромагнитные силы, под действием которых происходят слив металла и его транзитное движение в плавильном канале. Управление двумя основными параметрами установки, такими как температура металла и массовый расход металла через сливной металлопровод, осуществляется путем изменения направления в электромагнитных системах. Установка обеспечивает высокую производительность за счет сокращения вспомогательного времени, возможность увеличения числа деталей в форме для машин литья под давлением, снижение брака по неметаллическим включениям, высокую надежность при эксплуатации, улучшение санитарно-гигиенических условий труда литейщиков.

Контрольные вопросы

1. Что влияет на формирование конечной структуры отливки?
2. Какие агрегаты и устройства используют для заливки сплавов в формы?

3.2.5. Изготовление литых заготовок в разовых формах

3.2.5.1. Понятие об изготовлении форм и стержней

Разовые формы выдерживают только однократное заполнение жидким металлом, после кристаллизации отливки форма разрушается. Их изготавливают преимущественно из песчаных смесей, а для образования отверстий, каналов и полостей в отливках внутрь форм в процессе их сборки перед заполнением металлом помещают вставки, называемые стержнями, которые также делают из песчаных смесей. Разовые песчаные формы находят широкое применение в литейном производстве, в них из-

готовляют до 75 % всех отливок, применяемых в машиностроении. Этот способ получения литых заготовок отличается большой универсальностью. В разовых формах можно производить отливки различной сложности и массой от нескольких граммов до сотен тонн. В качестве литейных сплавов могут быть использованы чугуны, стали и цветные сплавы.

Разовые формы из песчаных смесей могут изготавливаться сырыми, когда форма перед заполнением металлом не подвергается сушке, и сухими, когда форму перед заполнением металлом не только просушивают, но и красят. Основное преимущество сырых форм в том, что они изготавливаются с наименьшими затратами и обеспечивают самую низкую себестоимость литья. При изготовлении крупногабаритных, тяжелых уникальных отливок, особенно стальных, имеющих высокую температуру плавления, сушка форм необходима. Сухая форма обладает повышенной механической и термической прочностью и успешно выдерживает воздействие больших масс жидкого металла не только в момент ее заполнения, но и в процессе кристаллизации и усадки сплавов.

Разовые литейные формы изготавливают машинным способом в серийном и массовом производстве, или ручными способами в единичном и мелкосерийном производстве. Изготовление литейной формы тем или иным способом называется **формовкой**. Для осуществления процесса формовки необходима литейная технологическая оснастка: модели, стержневые ящики, сушильные плиты для стержней, опоки и другие приспособления.

Модель — это формообразующее приспособление, с помощью которого в литейной форме делается отпечаток, соответствующий внешней конфигурации отливки.

Стержневой ящик — это приспособление, в котором изготавливают стержни из стержневой смеси.

Сушильные плиты для стержней (драйеры) могут быть плоскими и фасонными с углублениями, соответствующими конфигурации стержня, которые применяют для сохранения геометрических размеров стержней после извлечения их из стержневого ящика и в процессе сушки. В драйерах имеется перфорация для доступа горячего воздуха к поверхности стержней.

Опока представляет собой жесткую рамку, изготовленную методом литья из стали, чугуна, силумина или методом сварки из стальных штампованных пластин.

Литейная форма заполняется жидким металлом через каналы, которые называются **литниковой системой**. Конструкция литниковой системы должна обеспечивать: кратчайший путь металлу в полость формы, чтобы он не снижал температуру; минимальный расход металла на саму литниковую систему; минимальную площадь, занимаемую в форме литниковой системой; отсутствие препятствия при усадке отливок; легкое отделение от отливки в процессе выбивки формы; минимальное число точек подвода ме-

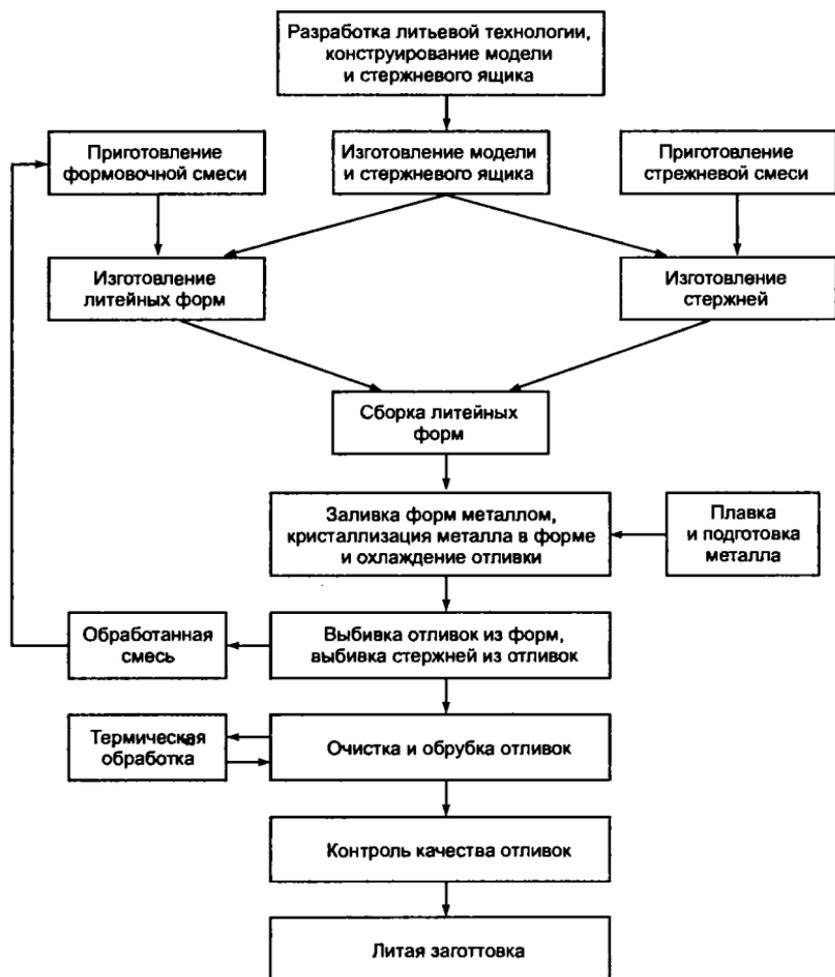


Рис 3.1. Упрощенная схема технологического процесса изготовления литой заготовки в разовой песчаной форме

талла к отливке с целью сокращения объема работ при зачистке отливок, а также быть универсальной по возможности.

Процесс извлечения отливки из формы и стержня из отливки называется **выбивкой**. После выбивки отливки подвергаются очистке от остатков формовочной и стержневой смеси, от них отделяется литниковая система, и зачищаются все неровности и шероховатости. Эти процессы называются очисткой и зачисткой.

Упрощенная схема всего процесса изготовления литых заготовок в разовых формах от разработки литейной технологии до получения готовой отливки представлена на рис. 3.1.

3.2.5.2. Разработка технологии получения литой заготовки в песчаной форме методом ручной формовки

В основу разработки технологии получения литой заготовки закладываются основные принципы: качество и экономичность. Литая заготовка должна быть качественной по структуре, механическим свойствам, химическому составу металла, иметь чистую, без дефектов поверхность, минимальные припуски на механическую обработку и полностью соответствовать эксплуатационным требованиям, чтобы обеспечить изделию максимальную надежность. Экономичность не должна означать снижения качества. Иногда дешевое изделие для цеха или предприятия становится очень дорогим для народного хозяйства из-за преждевременных ремонтов с большими затратами средств. Тщательная технологическая разработка дает значительную экономию средств, материалов и времени, повышая производительность труда и качество заготовок.

Разработка литейной технологии складывается из нескольких этапов. Основные этапы ее разработки таковы:

- конструирование модели с учетом усадки литейного сплава, припусков на механическую обработку, напусков, литейных (формовочных) уклонов, галтелей (радиусов скруглений в местах сопряжения поверхностей), назначения плоскости разъема модели и выбор положения модели в форме;
- конструирование стержня, выполняющего полости или отверстия в будущей отливке с его знаковыми частями; конструирование стержневого ящика для изготовления стержня и сушильных плит (драйверов);
- конструирование и расчет элементов литниковой системы и выбор места ее подвода к отливке;

- конструирование всех необходимых приспособлений — шаблонов, кондукторов и т. д.

При конструировании модели сначала разрабатывают технологический чертеж отливки. Для этого на чертеж детали условно наносят технологические указания (припуски, напуски, уклоны, галтели, разъемы, знаковые части), которые необходимо учесть при изготовлении модели. В соответствии с технологическим чертежом отливки, т. е. с учетом технологических указаний и величины усадки сплава, модельщики вычерчивают модель по специальному усадочному метру (линейке, учитывающей определенный процент усадки сплава).

Выбирая плоскость разъема модели, следует учитывать, что наиболее ответственные поверхности отливки лучше располагать в нижней части формы или вертикально, так как в верхней ее части скапливаются газы, неметаллические и шлаковые включения, что снижает качество поверхности отливок. Разъем модели выбирается с учетом удобства формовки и извлечения модели из формы.

3.2.5.3. Формовочные и стержневые смеси и их приготовление

Для изготовления разовых литейных форм и стержней, а также для облицовки изложниц и кокилей используют разнообразные формовочные смеси. Для получения качественных отливок с чистой поверхностью формовочные и стержневые смеси должны обладать: прочностью для сохранения геометрических размеров после извлечения моделей из формы или стержней из ящиков и при их транспортировании; огнеупорностью, чтобы при высоких температурах в момент соприкосновения с жидким металлом смесь не оплавлялась и не образовала пригары; газопроницаемостью, чтобы образовавшиеся газы и пары беспрепятственно могли выходить из полости формы в процессе заполнения ее металлом и не возникало газовых раковин в отливках; оптимальной влажностью для предотвращения вскипания влаги и образования пара в форме; пластичностью для получения точных отпечатков элементов моделей и стержневых ящиков; податливостью для предотвращения образования внутренних напряжений и трещин в отливках при их усадке в процессе кристаллизации; минимальной гигроскопичностью, чтобы не было переувлажнения форм за счет влажности окружающей атмосферы, которое может привести к потере ими прочности и появлению

газовых раковин в отливках; оптимальной теплопроводностью для нормальных условий кристаллизации отливки; высокой долговечностью для длительного сохранения заданных технологических и физических свойств; легкой выбиваемостью для свободного удаления смеси из опок и стержней из отливок.

Компоненты смеси должны быть дешевыми и обладать способностью к регенерации, т. е. восстановлению свойств для последующего использования.

Формовочные смеси для обычной ручной и машинной формовки состоят из песка (основа смеси), связывающих глин (глина плюс вода), противопригарных добавок (молотый кварц, маршалит, мазут), добавок, повышающих податливость и газопроницаемость смеси (древесные опилки, лигносульфанит), которые при соприкосновении с жидким металлом выгорают, образуя в смеси поры.

При изготовлении крупных сложных форм используют облицовочную (наносимую на поверхность модели) и наполнительную (заполняющую опоку) смеси. В массовом производстве чаще используют единые смеси для удобства автоматизации процессов формовки и повышения производительности труда.

Стержневые смеси для изготовления стержней, подвергающихся сушке в сушилах, состоят в основном из песка (редко — с добавками 3...10 % глины для простых стержней) и связывающих веществ (крепителей: льняное масло, сланцевая смола, сульфитный щелок, декстрин, канифоль и др.). Используются катализаторы: органические (бензолсульфокислота), неорганические (ортофосфорная кислота и др.), комплексные (для ускорения затвердевания формовочных смесей и стержней).

3.2.5.4. Способы изготовления разовых песчаных литейных форм и стержней

Разовые песчаные формы и стержни изготавливают в зависимости от их размеров, массы, вида формовочных и стержневых материалов и характера производства разнообразными способами.

Степень механизации и автоматизации также различна и зависит от вышеперечисленных факторов.

Наиболее часто применяемые способы:

- **ручной** — в условиях единичного и мелкосерийного производства. Широко используют средства механизации: краны, подъемники, пневматические трамбовки, передвижные

сушила и т. д. После сушки стержни зачищают, затирают пастами и красят;

- **с помощью пескометов** — единичное и серийное производство. Пескометы бывают стационарные и передвижные. Основной рабочий узел пескомета — метательная головка (она представляет собой вращающийся ротор с лопатами, заключенный в кожух с окном для выхода смеси). При ударе о поверхность модели или ящика благодаря кинетической энергии, приобретенной в метательной головке (скорость метания 30...50 м/с) смесь уплотняется. Перемещая метательную головку, равномерно заполняют опоки и ящики с одинаковой плотностью смеси по высоте. Формы и стержни из смеси на жидкостекольном связующем изготавливают по деревянной или металлической оснастке;
- **метод надува смеси** — литейные формы изготавливают на пескодувных, пескострельных и комбинированных пескодувнопеско-стрельных машинах высокой производительности. На этих машинах стержневая или формовочная смесь с помощью сжатого воздуха порциями с большой скоростью подается в полость стержневого ящика или в опоку;
- **стержни в горячих ящиках** изготавливают в условиях массового и крупносерийного производства. Затвердевание стержня происходит непосредственно в ящике, нагретом до температуры 200...250 °С, в результате реакции взаимодействия связующего вещества и катализатора, входящего в состав стержневой смеси;
- **стержни без нагрева** — изготавливают на автоматизированных установках. Процессы химического твердения смеси протекают при нормальной температуре с большой скоростью 10...15 с для мелких стержней и не более 40 минут для крупных стержней. Поэтому связывающее вещество и катализатор смешивают в бункере стержневой машины перед заполнением ящика смесью или катализатор вводят в стержневую смесь в момент ее подачи в ящик. Автоматическое устройство дозирует количество смеси в зависимости от объема заполняемых ящиков;
- **отливки в оболочковых формах** изготавливают в серийном и массовом производстве, когда необходимо получить точные заготовки с чистой поверхностью, минимальными припусками на автоматических и автоматизированных установках. Формовочные смеси состоят из кварцевого песка

с сухим пылевидным связующим (фенолоформальдегидной смолой — пульвербакелитом) или с жидким связующим (фурановыми, карбамидными смолами), для отверждения которых необходим катализатор.

Способы изготовления оболочковых форм и стержней многообразны, но среди них можно выделить наиболее распространенные: свободная засыпка смеси на поверхность модели или в полость стержневого ящика; подача смеси методом надува в полость ящика, на поверхность модели или в зазор между контурной плитой и моделью; заполнение ящика смесью под воздействием центробежных сил; диафрагменное уплотнение смеси на поверхности модели.

При оболочковом литье расход формовочных материалов составляет 5 % (в 20 раз меньше их расхода при отливке в сырую песчаную форму). Газопроницаемость их выше, но при этом выделяется много токсичных газов, содержащих фенол, что требует мощной вентиляции. Высокая стоимость модельной оснастки обусловлена большой точностью, малой шероховатостью поверхности и сложностью всей конструкции;

- **безопасная формовка** отличается высокой производительностью и экономичностью. Различают безопасные формы с горизонтальным и вертикальным разъемом. При таком способе изготовления форм достигается достаточная точность отливок, сокращаются площади цеха из-за отсутствия транспортных операций по передаче опок от выбивки к машинам. Упрощаются процессы выбивки отливок из форм;
- **пленочно-вакуумная формовка** находит широкое применение в условиях единичного и мелкосерийного производства для отливки штампов, кокилей, пресс-форм, стержневых ящиков, драйверов, различных барельефов;
- **литье по газифицированным моделям** используется для всех видов производства, начиная с изготовления крупных станин, штампов и ремонтного литья до получения отливок в массовом производстве малой массы. При этом могут быть использованы стали, чугуны, сплавы на основе алюминия и меди.

Сущность этого способа заключается в том, что модель из форм не извлекают перед заполнением ее металлом. Металл через литниковую систему заливают непосредственно на модель, которая под действием теплоты металла газифи-

цируется (выгорает), высвобождая полость формы. Полученные таким образом отливки точно соответствуют конфигурации выгораемой модели.

Литейные модели изготавливают из вспенивающегося полистирола (пенополистирола) — синтетического полимера, получаемого полимеризацией стирола.

Этот способ имеет ряд особенностей: благодаря неразъемной форме точность отливок увеличивается из-за отсутствия смещений, перекосов, заливов, заусенцев, уклонов; можно изготовить сложные отливки, не используя стержни; выбивка форм и отливок значительно упрощается, так как сухие сыпучие формовочные материалы легко выбиваются и не пригорают к отливке; сокращается цикл подготовки производства;

- **отливки по выполняемым моделям** изготавливают в массовом производстве, когда необходимо получить сложные заготовки или готовые детали с большим числом мелких отверстий, пазов, каналов или детали из твердых сплавов, жаропрочных материалов, которые не поддаются механической обработке. Высокая точность отливок достигается тем, что форма не имеет разъема, отсутствуют стержни, а тепловое расширение формы минимальное.

Сущность процесса заключается в изготовлении модели легкоплавкого материала, покрытии модели огнеупорной обмазкой, а затем выплавлении ее из образовавшейся оболочки. Оболочку прокаливают для придания ей прочности, огнеупорности, газонепроницаемости, удаляют остатки модели, а затем заливают металлом. Это точное литье, процесс автоматизирован.

Технологическая последовательность процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям представлена на рис. 3.2.

Металлическую пресс-форму 2 изготавливают по размерам детали 1 с учетом усадки модельного состава и сплава. Внутри рабочей полости пресс-формы с помощью шприцев через литниковые каналы запрессовывают модельный состав. После кристаллизации состава пресс-форму раскрывают и легкоплавкую модель 3 извлекают.

Отдельные модели собирают в блоки 4 с общей литниковой системой с помощью пайки. В одном блоке может быть несколько десятков и даже сотен моделей.

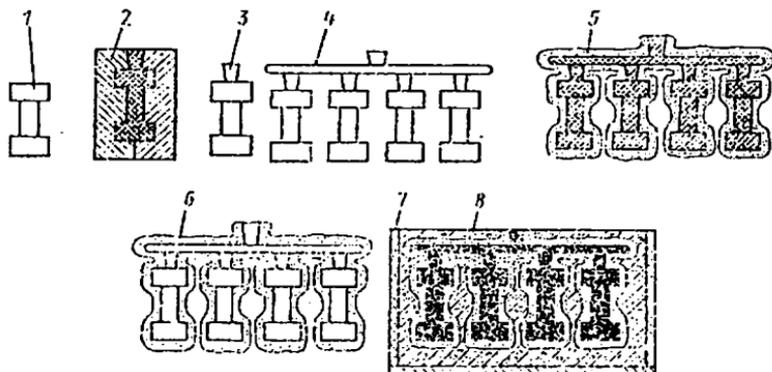


Рис. 3.2. Технологическая последовательность процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям: 1 — деталь; 2 — металлическая пресс-форма; 3 — легкоплавкая модель; 4 — блок моделей; 5 — огнеупорное покрытие; 6 — керамическая оболочка; 7 — опока; 8 — песок

Процесс нанесения огнеупорного покрытия состоит из ряда повторяющихся операций: покрытие обмазкой, обсыпка огнеупорным материалом и сушка слоя. На модели наносят три-четыре огнеупорных слоя. Блок моделей 4 с огнеупорным покрытием 5 поступает на выплавку модельного состава. Выплавляют модельный состав горячим воздухом, паром или в ваннах с горячей водой. В результате из керамической оболочки 6 вытекает расплавившийся модельный состав, оставляя пустоты. Затем оболочку прокаливают при температуре 850 ± 20 °С в электрических или газовых печах с предварительным помещением их в опоки 7 и засыпкой опок песком 8 (или погружением в кипящий слой кварцевого песка). Прокалка форм способствует их упрочнению, повышению газонепроницаемости и удалению остатков модельного состава. Прокаленные формы заливают металлом сразу после прокалки или после их охлаждения.

Заливку металла осуществляют следующими способами: свободной заливкой из разливочного ковша или из носка печи; заливкой под давлением воздуха или инертного газа для повышения заполняемости формы, центробежной заливкой в вакууме или в атмосфере для получения отливки с плотной структурой.

После кристаллизации сплава отделяют огнеупорную оболочку от отливки и отливку от стояка. Для этого используют вибрационные автоматические установки. Далее отделенную отливку направляют в очистной барабан для удаления остатков ог-

неупорной керамической оболочки в щелочном растворе. Стальные отливки подвергают нормализации и нагреву в печах с защитной атмосферой. Термическая обработка преследует цель улучшить структуру и механические свойства отливки, снизить твердость, повысить и улучшить обрабатываемость резанием и снизить литейные напряжения. После этого отливки сортируют и проверяют их качество.

3.2.5.5. Использование групповой технологии формовки и гибких технологических модулей

Групповая технология формовки предусматривает широкое использование унифицированной литейной оснастки, которая состоит из неформообразующих стандартных частей (опок, подмодельных плит, сушильных плит, корпусов стержневых ящиков и т. д.), и формообразующих элементов оснастки (модели, рабочие части ящиков). Рабочие части ящиков в виде вкладышей делаются под конкретную отливку и являются быстросменными.

Групповая технология требует тщательного группирования отливок на основе их конструктивно-технологической общности (размеры, масса, конфигурация) и экономически целесообразна в условиях серийного и мелкосерийного производства. При этом сокращаются сроки подготовки производства, снижается себестоимость литья, обеспечивается возможность высокой механизации и автоматизации производства.

Гибкие технологические модули применяют для изготовления песчаных литейных форм для автоматизированного производства широкой номенклатуры отливок.

Основными узлами гибких модулей являются базовая формовочная машина, которая может перенастраиваться на разные способы уплотнения литейных форм (пескодувно-прессовый, встряхивание с прессованием, импульсный, широкозахватной пескометной головкой); участок сборки и выдачи готовых форм; участок выбивки; участок транспортирования пустых опок к формовочной машине. Агрегатирование формовочной линии на базе отдельных самостоятельных технологических узлов, участков и механизмов, связанных между собой системой управления, позволяет быстро комплектовать и собирать формовочную линию под разнообразную номенклатуру отливок.

Система управления выполняется на основе микровычислительного комплекса с использованием ЭВМ, позволяющим, кро-

ме управления оборудованием, оперативно решать задачи организации работы. Агрегатирование формовочных линий позволяет автоматизировать трудоемкие процессы изготовления литейных форм и создавать гибкие производства с использованием роботов и манипуляторов на базе стандартного оборудования.

Контрольные вопросы

1. Какие бывают разовые формы? Что такое стержни?
2. Что такое модель, опока?
3. Для чего служит литниковая система?
4. Из каких этапов складывается разработка литейной технологии?
5. Каков состав формовочных и стержневых смесей и какими свойствами они должны обладать?
6. Какими способами изготавливают разовые песчаные формы и стержни?
7. В чем заключается процесс литья по газифицированным моделям?
8. Какова сущность процесса получения отливки по выплавляемым моделям?
9. Что предусматривает применение групповой технологии?

3.2.6. Изготовление отливок в многократных формах

3.2.6.1. Понятие о литье в многократные формы

Получение отливок в многократных (постоянных и полупостоянных) формах имеет свои особенности.

В большинстве случаев многократные формы изготавливают из металла. Они имеют точные размеры, низкую шероховатость рабочих поверхностей; обладают высокой теплопроводностью, но отличаются от разовых песчаных форм сложностью конструкции. Интенсивность охлаждения отливок в металлических формах в 3...5 раз выше, чем в песчаных.

Жесткие, прочные и точные металлические формы позволяют получить отливки повышенной точности, с чистой поверхностью и минимальными припусками на механическую обработку. При этом в литейных цехах сокращаются, а в некоторых случаях и совсем отсутствуют, затраты на изготовление формовочных и стержневых смесей, изготовление форм и стержней, обрубку и очистку отливок. Возрастает уровень автоматизации производст-

ва, повышается производительность труда, улучшаются санитарно-гигиенические условия.

Экономическая эффективность способов литья в металлические формы зависит от стойкости форм, которая оценивается числом заливок их металлом от начала работы до износа. Для сохранения рабочих поверхностей металлических форм на них наносят термостойкие и теплоизоляционные покрытия. Толщина слоя поверхностного покрытия регулирует интенсивность теплообмена между отливкой и формой. Стойкость металлической формы тем выше, чем больше толщина покрытия и меньше коэффициент теплопроводности этого покрытия, чем ниже температура заливки и выше начальная температура формы. Постоянство температуры формы снижает интенсивность термических ударов при заполнении ее жидким металлом и сохраняет постоянство геометрических размеров отливок, а также их точность.

3.2.6.2. Изготовление отливок в металлических многократных формах

Литье в кокиль. Литье в кокиль получило широкое распространение для изготовления отливок из черных и цветных сплавов.

Кокиль — это металлическая разъемная или неразъемная, многократно используемая литейная форма, изготавливаемая из чугуна, стали, алюминиевых сплавов с анодированной поверхностью или меди. Он служит для образования наружных очертаний отливки, внутренние полости и отверстия образуются с помощью стержней. Металлическая форма обладает повышенной теплопроводностью, что влияет на процесс формирования отливки.

При использовании кокилей вместо песчаных форм повышается эффективность использования металла за счет упрощения литниковой системы, сокращения прибылей и уменьшения припуска на механическую обработку, а также снижается трудоемкость.

В литейных цехах все шире применяют автоматизированные линии, оснащенные карусельными кокильными машинами (это поворотная машина, на которой расположено восемь кокилей). Поворот карусели совершается периодически гидроприводом. Вода для охлаждения кокилей подводится через центральную колонку, а затем по трубопроводам к кокилям.

Заливка кокиля металлом производится двухприводной установкой. Ковши используются поочередно. Механизм обдува предназначен для очистки кокиля после извлечения отливки. Устройство отделения литника имеет в своем составе дисковой нож, предназначенный для отрезания литниковой системы от отливки. Для передачи отливок от карусельной машины к электропечи отжига имеется конвейер. Между печью и конвейером расположен механизм загрузки. За отжигательной печью находится участок охлаждения. Управление машиной осуществляется с пульта, расположенного в кабине.

Литье в облицованные кокили. Литье в облицованные кокили по сравнению с литьем в песчаные формы позволяет значительно уменьшить припуски на механическую обработку, в 10...20 раз сократить расход стержневых и формовочных смесей, в 1,5...2 раза снизить объем очистных и обрубных работ, улучшить условия труда и повысить производительность.

Облицованный кокиль — это металлическая форма с термоизоляционной облицовкой на основе термореактивных смол (оболочковые смолы), изготавливаемая путем надува термореактивной смеси в зазор, образованный предварительно нагретым кокилем и моделью. Литье в облицованные кокили эффективно применяется в массовом производстве: в авто- и тракторостроении для отливки распределительных валов, в электротехнической промышленности, транспортном машиностроении.

Центробежное литье — это способ получения литых заготовок во вращающихся металлических формах-изложницах, рабочая поверхность которых покрыта огнеупорной краской или футерована огнеупорной смесью. Под воздействием центробежных сил жидкий металл прижимается к внутренним рабочим стенкам изложницы и кристаллизуется, образуя отливку. Наружная поверхность отливки образуется рабочей поверхностью изложницы, а внутренняя является свободной и имеет цилиндрическую форму. Вращение изложниц может происходить относительно вертикальной, горизонтальной и наклонной осей. Этим способом преимущественно изготавливают отливки, имеющие форму тела вращения (трубы, гильзы, втулки, ободья, бандажи, венцы, обечайки, кольца и т. д.). Можно отливать и фасонные мелкие отливки самых разных конструкций методом центрифугирования, когда изложница (литейная форма) имеет рабочие полости по периферии. Частота вращения изложницы зависит от диаметра отливки и плотности сплава, она должна быть такой, чтобы

центробежная сила на свободной поверхности отливки превышала силу тяжести металла, т. е. чтобы не происходило отрыва капель металла от внутренней поверхности отливки в верхнем положении.

К недостаткам этого типа литья можно отнести: возможность ликвации (т. е. разделения жидкого металла на две несмешивающиеся части) высоколегированных сплавов и получение полосчатой структуры по сечению отливок; повышенную окисляемость металла в результате длительного контакта в жидком состоянии с воздухом; возможность появления отбела (образование цемента Fe_3C , обуславливающего твердость) в чугунных отливках.

Для облегчения условий работы, повышения их долговечности и предотвращения контакта с расплавленным металлом, а также для предотвращения отбела в чугунных отливках используют разделительные теплоизоляционные составы в виде красок, порошков, стержневых вставок, футеровки из формовочных и огнеупорных материалов.

Литье под давлением — это процесс получения отливок в металлических формах, называемых пресс-формами, в которые расплавленный металл поступает через литниковую систему под высоким давлением. Высокое давление создается за счет сжатия жидкого металла в камере прессования литейной формы.

Отливки формируются в стальной пресс-форме, выполненной из высококачественной стали с малой шероховатостью и большой точностью рабочей полости. Внутренние полости в отливках получают с помощью металлических стержней, которые извлекают из отливки в момент раскрытия пресс-форм для удаления отливки.

Ввиду большой сложности и высокой стоимости пресс-форм для этого способа литья наиболее экономичны сплавы с невысокой температурой плавления на основе меди, магния, алюминия, цинка и др., которые оказывают незначительное тепловое воздействие на пресс-формы, связанное с их разгаром, растрескиванием и короблением рабочей поверхности. Этот способ экономически целесообразен в массовом производстве, когда в одной пресс-форме можно получить десятки тысяч сложных отливок с высокой точностью размеров и малой шероховатостью поверхности, не требующей последующей механической обработки.

Литье под давлением осуществляется на поршневых машинах с холодной или горячей камерой прессования. Машины для литья под давлением современной конструкции имеют полно-

стью автоматизированный рабочий цикл, с программным управлением. Применяются поршневые машины с холодной горизонтальной и вертикальной камерой прессования, а также поршневые машины с горячей камерой прессования. Для литья под давлением все шире начинают применяться не отдельные машины, а целые робототехнические комплексы и комплексы околос машинной механизации. В состав такого комплекса входят: сама машина для литья под давлением; автоматический манипулятор для дозированной заливки сплава; промышленный робот для удаления отливки из пресс-формы, охлаждения и передачи ее в штамп обрезного прессы; пресс для обрезки литников и облоя.

В автоматическом режиме без участия человека можно выполнять следующие технологические операции:

- обдувку, смазку и запираание пресс-форм;
- дозирование, транспортирование и заливку металла;
- прессование;
- удаление отливки из формы;
- перемещение отливки в зону обрезного прессы;
- обрезку пресс-остатка, литников и облоя в обрезном прессы;
- удаление отливки из обрезного прессы.

Система автоматического управления оборудована ЭВМ.

Литье под низким давлением применяют для получения крупных толстостенных корпусных заготовок из легкоплавких сплавов, главным образом на основе алюминия. Способ пригоден для получения сложных отливок из чугуна.

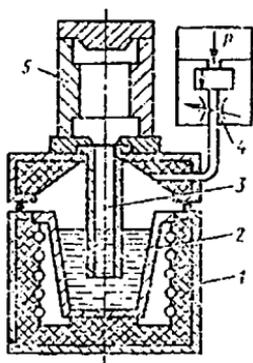


Рис. 3.3. Схема установки для литья под низким давлением: 1 — тигельная печь сопротивления; 2 — тигель; 3 — металлопровод; 4 — прибор; 5 — кокиль

При литье под низким давлением (регулируемым) повышаются физико-механические характеристики литого металла, размерная точность отливок, снижается шероховатость поверхности, уменьшается расход металла на литниковую систему, сокращается брак по пористости и негерметичности изделий. При этом припуски на механическую обработку могут быть получены минимальными. Для реализации этого метода литья используют автоматизированные установки (рис. 3.3).

Металл расплавляется в тигельной печи сопротивления 1 в тигле 2, который герметично соединен с литейной металлической разъемной формой (кокилем) 5 металлопроводом 3 в виде трубы. Одна или несколько форм находятся над тиглем плавильной печи. Формы могут быть с горизонтальным и вертикальным разъемом. Расплавленный металл из тигля 2 под давлением инертного газа или воздуха $0,01...0,08 \text{ МН/м}^2$, которое регулируется прибором 4, выжимается по трубчатому металлопроводу в полость формы 5, где он кристаллизуется в пространстве между формой и стержнем.

Стержень может быть изготовлен из обычной стержневой песчаной смеси. Давление инертного газа требуется незначительное, потому что площадь зеркала расплавленного металла во много раз больше площади металлопровода. Незначительные перемещения металла в тигле дают высокий подъем жидкого металла внутри металлопровода и в литейной форме. После кристаллизации отливки давление инертного газа снимается, а литейная форма раскрывается, и из нее извлекают отливку.

Брак по пористости и негерметичности отливок по сравнению с песчаной формой снижается в 2...4 раза. Производительность установок достигает 25...30 заливок в час при максимальном размере пресс-форм (кокилей) 700...8000 мм.

Литье методом жидкой прокатки применяют для изготовления ленты, полосы, листа из цветных сплавов, припоев и даже чугуна. Процесс начинается на установках, по принципу работы напоминающих прокатный стан (рис. 3.4).

Жидкий металл из ковша 1 наливается в приемник 2, из которого он поступает на поверхность охлаждаемых внутри водой валков 3 и 4, вращающихся навстречу друг другу. При этом начинается кристаллизоваться металл 5, который в пластичном состоянии выжимается в зазор между валками.

Производство ленты и листов в крупных масштабах непосредственно из жидкого металла, минуя прокатку слитков, осуществляется в следующей последовательности: плавка металла, формирование ленты на валках-кристаллизаторах, намотка ленты в рулон или

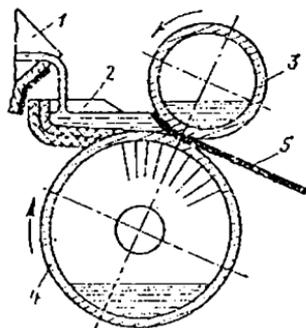


Рис. 3.4. Схема процесса жидкой прокатки: 1 — ковш; 2 — приемник; 3, 4 — валки; 5 — металл

разрезка ее на листы. Если необходима дополнительная прокатка для получения тонкостенной продукции, проводят термическую обработку и холодную обработку прокаткой. Таким способом можно получать тонкий лист из чугуна для использования его в качестве кровельного материала или медно-фосфористые припои в виде тонких полос для удобства пайки меди и ее сплавов. Комплексно механизированные линии производят, например, ленты шириной 750 мм и толщиной 0,7...2,5 мм со скоростью непрерывного литья 0,5... 1,5 м/с с общей производительностью 12 т/ч.

Жидкая и полужидкая штамповка представляют собой гибридную технологию, сочетающую процессы литья и обработки металлов давлением. От литья эти процессы заимствуют высокую экономическую эффективность и возможность получения сложных изделий, а от обработки давлением — возможность производства очень прочных изделий с благоприятной микроструктурой, свойственной этому виду обработки. Этим процессом за один переход можно получить сложное изделие, а методом объемной штамповки такое изделие можно изготовить только за несколько переходов.

Так же, как и литье под давлением, жидкая штамповка позволяет получить биметаллические изделия путем применения вставок из различных металлов в форму перед заполнением ее металлом.

Процесс штамповки жидкого и полужидкого сплава основан на затвердевании расплавленного металла под давлением в штампе прессы. Штамп предварительно подогревается, и в нижнюю его часть (матрицу) заливают строго дозированную порцию металла, а затем смыкают с помощью прессы нижнюю часть с верхней (пуансоном). При этом расплавленный металл заполняет всю рабочую полость штампа. Давление поддерживают до полного затвердевания металла, что обеспечивает высокую плотность изделий, а высокая скорость теплоотдачи способствует образованию мелкозернистой структуры. Внешнее давление во время кристаллизации и в период пластичного состояния сплава способствует образованию мелкозернистой структуры.

Процесс изготовления можно разделить на три стадии (рис. 3.5):

- заливка порции расплавленного металла 3 через желоб 4 в матрицу 2 (рис. 3.5, а);
- смыкание матрицы 2 и пуансона 5 (рис. 3.5, б);

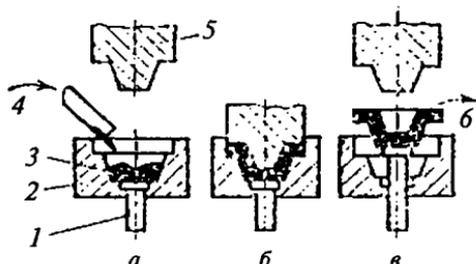


Рис. 3.5. Схема и стадии процесса жидкой штамповки: 1 — выталкиватель; 2 — матрица; 3 — металл; 4 — желоб; 5 — пуансон; 6 — изделие

- раскрытие штампа и извлечение изделия *б* из матрицы выталкивателем (рис. 3.5, *в*).

При этом отсутствует литниковая система, уклоны литейной формы-штампа имеют минимальное значение, так как отливка удаляется принудительно выталкивателем. Это способ находит широкое применение для изготовления из медных и алюминиевых сплавов различных фитингов, кронштейнов, барабанов и даже дисков колес автомобилей и мотоциклов.

Пластическое деформирование металла в процессе кристаллизации (сочетание литья и обработки давлением) способствует повышению его механических свойств, например, предела прочности σ_b и относительного удлинения δ .

Непрерывное литье предназначено для получения заготовок из черных и цветных сплавов разнообразного профиля. Установки для непрерывного литья бывают вертикального и горизонтального типа (рис. 3.6).

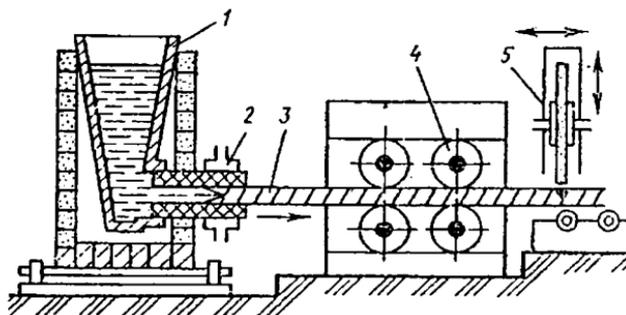


Рис. 3.6. Установка горизонтального типа для непрерывного литья: 1 — металлоприемник; 2 — кристаллизатор; 3 — заготовка; 4 — тянущее устройство; 5 — устройство резки

Расплав заливают в металлоприемник 1, откуда он поступает в водоохлаждаемый кристаллизатор 2 с графитовой вставкой. Применение графита обусловлено тем, что он обладает высокой теплопроводностью и термостойкостью, достаточной прочностью при высоких температурах и низким коэффициентом теплового расширения, он плохо смачивается расплавленным металлом и не требует смазки.

Кристаллизатор изготавливают легкоотъемным от металлоприемника, что делает возможным быструю переналадку установок на любой профиль. Из кристаллизатора заготовка 3 непрерывно вытягивается тянущим устройством 4, а кристаллизатор постоянно заполняется жидким металлом.

Таким образом, процесс литья может протекать непрерывно. Разрезка заготовок на мерную длину производится устройством 5. Металлоприемник 1 выполняет роль постоянно действующей прибыли, что способствует получению плотной и качественной заготовки. Применение индукционного миксера обеспечивает постоянство температуры металла, что очень важно для заготовок сложного профиля.

Непрерывное горизонтальное литье является малоотходным, а в некотором случае и безотходным видом технологии. Применение данной технологии снижает на 30 % себестоимость продукции, в 3...4 раза повышает производительность труда. Непрерывное литье чугунных заготовок на машинах горизонтального типа дает большой экономический эффект по сравнению с литьем в сырые песчаные формы. Широкое применение этот метод получил в станкостроении для отливок столов с пазами, направляющих станин, колонн, ползунов суппортов, салазок и других деталей.

Полунепрерывное литье применяют для изготовления труб различного профиля (круглого, квадратного, прямоугольного, шестигранного и др.) с поперечным размером до 1000 мм и длиной до 10 м.

Сплавы могут быть как железоуглеродистые, так и цветные (бронзы, латуни). Литье этим способом осуществляется преимущественно на установках вертикального типа (рис. 3.7).

Суть способа заключается в том, что металл 3 из ковша 4 заливается в зазор между стержнем 2 и кристаллизатором 1, выполняющим функции литейной формы. Кристаллизатор 1 и стержень 2 — пустотелые и охлаждаются водой

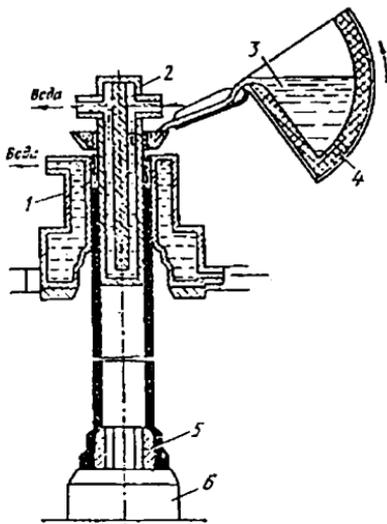


Рис. 3.7. Установка вертикального типа для полунепрерывного литья: 1 — кристаллизатор; 2 — стержень; 3 — металл; 4 — ковш; 5 — затравка; 6 — стол

Для начала процесса литья в зазор между формой и стержнем перед заполнением его металлом вводят ложное дно — затравку 5, которая соединяется с расплавленным металлом и по мере кристаллизации сплава постепенно извлекается из кристаллизатора 1. Вытягивание затравки и соединившейся с ней отливки осуществляется приводными роликами или столом 6, на котором была закреплена затравка.

Таким образом, из формы вытягивается литая заготовка, профиль сечения которой соответствует просвету между стержнем и кристаллизатором. Поверхность отливок получается чистой и гладкой, а структура мелкозернистой и плотной. Для получения внутреннего отверстия в отливке не требуется песчаный стержень и не расходуется металл на литниковую систему.

Литьем вакуумным всасыванием получают отливки простой формы в виде втулок, колец, заготовок зубчатых колес из цветных сплавов (бронзы, латуни) (рис. 3.8).

Для этого на поверхность расплавленного металла 1 помещают огнеупорное керамическое плоское кольцо 2, на которое вертикально устанавливают металлическую полую водоохлаждаемую литейную форму 3 — кристаллизатор. Внутри формы вакуум-насосом создается разрежение, и расплавленный металл 1 втягива-

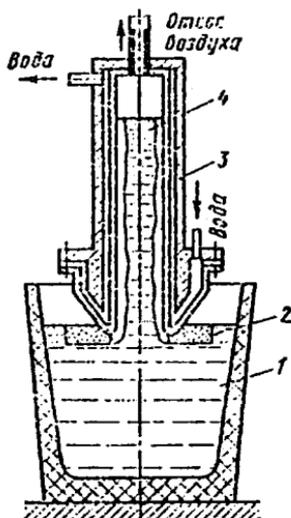


Рис. 3.8. Установка для литья вакуумным всасыванием: 1 — металл; 2 — плоское кольцо; 3 — литейная форма; 4 — отливка

ется внутрь холодной формы, где и кристаллизуется. Форму удаляют с поверхности расплавленного металла, разрежение исчезает, и отливку 4 свободно извлекают из формы. Кристаллизация отливки происходит последовательно к центру, поэтому отсутствуют раковины, пористость и хорошо удаляются газы. Кроме этого, не расходуется металл на литниковую систему.

Литье выжиманием применяют для получения тонкостенных (2...5 мм) отливок типа панели с большими габаритами (2500 мм) преимущественно из алюминиевых и магниевых сплавов.

Установки, применяемые для этого вида литья, бывают различной конструкции: с угловым и плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы.

Литье намораживанием применяют для изготовления лент, труб с внутренними и наружными ребрами и других сложных профилей из малопластичных сплавов.

На поверхность расплавленного металла помещают плиту из огнеупорного материала, в которой имеется отверстие такого профиля, как профиль будущего литого изделия.

Внутри отверстия вводят затравку, к которой приваривается металл. При вытягивании затравки со скоростью, не превышающей скорости кристаллизации металла, из отверстия плиты извлекают заготовку соответствующего профиля.

Электрошлаковое литье — это способ получения литых изделий путем электрошлакового переплава расходуемых электродов в кристаллизаторе сложной формы, выполняющем функции литейной формы. Внутренние полости в отливках получают с помощью постоянных водоохлаждаемых стержней — доноров. Таким способом можно изготавливать биметаллические и многослойные отливки.

Наиболее простой метод электрошлакового литья — это литье методом заполнения, когда кристаллизатор постепенно снизу вверх заполняется металлом расходуемого электрода.

Получили развитие электрошлаковое кокильное и центробежное электрошлаковое литье.

Электрошлаковая отливка отличается химической и структурной однородностью металла, т. е. свободна от ликвации, в ней отсутствуют дефекты усадочного происхождения и газовые поры.

Электрошлаковое литье применяют как в крупносерийном производстве, так и при изготовлении единичных уникальных изделий. Широко используется для сосудов высоких давлений, ответственных коленчатых валов и шатунов, запорной энергетической арматуры, ответственной технологической оснастки и инструмента.

Литье волокнистых композиционных изделий — это прогрессивный, бурно развивающийся технологический процесс в современном машиностроении. Литые волокнистые композиционные материалы (они состоят из бора в виде тонких волокон и алюминия, магния и др.) отличаются высокой прочностью, выносливостью и малой плотностью, что позволяет уменьшить массу конструкции на 18...60 % по сравнению с традиционными сплавами.

Для изготовления композитов используют различные методы: горячее прессование, пайку, пропитку расплавленными металлами, диффузионную сварку, плазменное напыление и др.

Одним из наиболее эффективных методов получения композитов является метод литья, обеспечивающий непрерывность процесса и возможность изготовления изделий большой длины (20 м и более). Волокна бора протягиваются через расплав алюминия со скоростью 450 м/ч. Протягивание через расплав происходит сверху или снизу. Таким способом могут быть получены изделия различного профиля.

Литье биметаллических отливок применяется в машиностроении и приборостроении для получения в одной детали участков

с различными физическими и механическими свойствами. Биметаллические и многослойные литые изделия изготавливают методом заливки жидкого металла на твердую основу либо послойной заливкой форм сплавами различного химического состава.

Используя различные по химическому составу и свойствам материалы, технология биметаллического литья позволяет получить изделия с различными эксплуатационными характеристиками в различных частях изделия. Увеличивается надежность и износостойкость литых изделий. Биметаллические отливки могут быть получены в стационарных песчаных и металлических формах электрошлаковым литьем, литьем под давлением и центробежным литьем.

Применяется в двигателестроении (гильзы, цилиндры, поршни, штанги, толкатели), в химическом и энергетическом машиностроении, машиностроении для нефтеперерабатывающей и пищевой промышленности, в приборостроении.

Метод литья в керамические формы. Огнеупорные формы, изготавливаемые из керамических смесей, графита, шамота и бетона применяются в промышленности для производства сложных и точных отливок массой от нескольких килограммов до нескольких тонн с криволинейными поверхностями из труднообрабатываемых, а также обычных черных и цветных сплавов. Наибольшее распространение получили формы из керамических смесей.

Литейная керамическая форма может быть монолитной и двухслойной. Двухслойные применяют для крупных отливок. Облицовочный слой, соприкасающийся с моделью, делают из керамики, наполнитель (опорный слой) состоит, например, из дешевой шамотной крошки. Модели перед формовкой для предотвращения прилипания смеси покрывают разделительными составами, например, силиконовой жидкостью.

Метод литья в керамические формы ускоряет процесс изготовления очень точной и сложной технологической оснастки или отдельных ее частей. При этом на 60 % сокращается объем механической обработки оснастки со сложными криволинейными поверхностями, и на 50 % сокращается расход высоколегированных сплавов.

Недостаток этого метода: обезуглероживание поверхностного слоя стальных отливок из-за взаимодействия формы с углеродом стали, что снижает эксплуатационные свойства отливок. Для предотвращения этого керамические формы после прокалики пропи-

тывают 10-процентным раствором пульвербакелита в спирте, а затем просушивают и прокаливают вновь.

Этот метод литья используют для отливки форм, в которых получают изделия из хрусталя и стекла, а также в ювелирной промышленности для отливки украшений из драгоценных металлов, а также в зубопротезировании.

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества получения отливок в многократных формах?
2. Какие существуют методы получения отливок в многократные формы?
3. В чем заключается процесс литья в кокиль?
4. Какова сущность центробежного литья?
5. В чем заключается метод жидкой прокатки? Для получения каких заготовок он применяется?
6. Какие преимущества имеет метод литья в керамические формы?

3.2.7. Выбивка, очистка и обрубка отливок

3.2.7.1. Общие сведения

После заполнения литейной формы металлом происходит кристаллизация отливки. В зависимости от состава сплава и размеров отливки процесс кристаллизации длится от нескольких минут до нескольких недель. Для сокращения цикла охлаждения крупных отливок в форме иногда применяют искусственные меры, например, продувку через трубки, вмонтированные в формы. Длительное охлаждение отливок в форме экономически не выгодно, но ранняя выбивка может привести к деформации и разрушению отливок ввиду недостаточной точности и повышенной пластичности. Способ извлечения отливок из форм зависит от размеров формы, характера производства, способов изготовления форм и сплавов, из которых получены отливки.

3.2.7.2. Выбивка отливок из форм и стержней из отливок

Для выбивки отливок из форм используют автоматические выбивные установки с решетками инерционного и встряхивающего типа, с механическим или пневматическим приводом.

В литейных цехах для сокращения цикла выбивки и очистки отливок и улучшения условий труда применяют агрегаты, в которых совмещаются несколько трудоемких процессов: разрушение кома формовочной смеси, выбивка стержней из отливок, отделение литниковой системы и прибылей от отливок и частичная (первичная) очистка отливок. Поточная линия состоит из вращающегося барабана для разрушения кома и разделки блоков отливок, конвейера для загрузки кома с блоками отливок, ленточного конвейера сортировки литья, лотка разгрузочного и ограждения.

Выбивку стержней из крупных отливок осуществляют в гидравлических камерах, где отливка устанавливается на поворотный стол и обрабатывается струей воды под давлением 5...10 МПа, вытекающей из сопла диаметром 5...20 мм.

Струя воды разрезает и вымывает стержни из отливки и одновременно чистит отливку от остатков формовочной смеси. Стержни из менее крупных отливок могут удаляться пневматическими устройствами типа отбойных молотков.

Выбивка стержней из корпусных отливок в массовом производстве осуществляется на вибрационных пневматических установках.

3.2.7.3. Очистка отливок

На поверхности и во внутренних полостях отливок после извлечения их из форм имеется пригар, остатки формовочной и стержневой смесей, заусеницы и заливы, которые необходимо удалить перед механической обработкой.

В настоящее время существует большое количество вариантов технологии очистки литых заготовок, применяемых в зависимости от характера производства, массы и размера отливок, сложности конфигурации, метода получения отливок и сплава, из которого изготовлены отливки.

Для массового производства используют многотурбинные дробеметные камеры проходного типа, дробеметные барабаны периодического и непрерывного действия (проходные барабаны).

Широкое применение также находят электрохимическая, электрогидравлическая, пескогидравлическая и другие виды очистки.

Дробеметная очистка отливок наиболее распространена в литейном производстве, а также имеет широкое применение в куз-

нечном и термическом производствах. Основным рабочим органом этих установок является турбина, а рабочим телом — дробь из чугуна, стали или алюминия. Очистной дробеметный барабан периодического действия имеет одну или две дробеметные турбины, установленные на его крыше. Очистные дробеметные барабаны непрерывного действия применяют в поточном массовом производстве. Барабан непрерывно вращается, не останавливаясь для загрузки и выгрузки отливок, которые подаются непрерывно, что повышает производительность и сокращает цикл производства. Дробеметные камеры непрерывного действия проходного типа используют для очистки сложных корпусных отливок в массовом, поточном производстве. Перемещение отливок в дробеметной камере осуществляется цепным конвейером, на котором смонтированы подвески с крючками для размещения отливок. Подвески с отливками имеют привод и вращаются вокруг собственной вертикальной оси. Цепной конвейер совершает внутри камеры 2...3 поворота для более эффективной очистки, причем движения его пульсирующие.

Турбины на станке камеры расположены так, что веер вылетающей из них дроби обсыпает отливки с разных сторон по мере их продвижения от турбины к турбине внутри камеры. Дробь циркулирует в камере по замкнутому циклу.

Электрохимическую очистку отливок осуществляют в расплаве щелочей (70...80 % едкого натра плюс 20...30 % едкого кали) при пропускании через расплав постоянного электрического тока напряжением 2,5...6 В и плотностью 5...10 А/см² при температуре расплава 350...450 °С. Этот метод основан на растворении пригара и восстановлении окалины в щелочном расплаве при наложении поля постоянного тока. В процессе очистки полярность тока через каждые 5 мин меняется. Технологический процесс электрохимической очистки обеспечивает возможность одновременной очистки наружных и внутренних поверхностей, полное удаление пригара, окалины и кремнезема с поверхности отливок, значительное улучшение санитарно-гигиенических условий труда.

Электрогидравлическая очистка применяется для отливок со сложными внутренними полостями (типа головки блоков цилиндров), изготавливаемых из чугуна, стали и цветных сплавов. Этот метод по своим технологическим возможностям превосходит все существующие промышленные методы, обеспечивает высокие технико-экономические показатели при улучшении ус-

ловий труда на очистных участках литейных цехов. Принцип действия установки заключается в использовании электрогидравлического эффекта, возникающего в воде между специальным электродом и поверхностью отливки.

Ультразвуковая очистка применяется для мелких деталей в жидкостной ванне, в которую можно добавлять абразивный материал. Высокочастотные колебания среды, окружающей отливки, способствуют отделению от их поверхности ржавчины, окалины, пригара и снятию заусенцев. После очистки, отливки из абразивной среды извлекают магнитным устройством и промывают.

Гидропескочистку применяют для чугунных и стальных отливок крупных размеров. Одновременно с очисткой поверхности отливок удаляются и стержни из них. В качестве очистного аппарата используют гидрометр, работающий под большим давлением. Вода с песком подается с большой скоростью и высоким давлением на поверхность отливки, при этом пригар, песок, формовочная и стержневая смеси удаляются с очищаемой поверхности.

Очистка отливок в галтовочных барабанах происходит при вращении барабана за счет соударения их между собой и с чугунными остроугольными многогранниками, «звездочками», загружаемыми в барабан одновременно с отливками.

Галтовочные барабаны периодического действия, их также можно применять в поточном, массовом производстве для очистки толстостенных отливок простой формы.

3.2.7.4. Обрубка и зачистка отливок

После очистки от остатков формовочной и стержневой смесей и пригара на отливках остаются следы подвода питателей, заливы, заусеницы, наросты и различные неровности. Все неровности удаляются с поверхности отливок путем обрубki зубилами, зачисткой абразивными кругами или воздушно-дуговой электрорезкой. Сущность процесса воздушно-дуговой резки заключается в непрерывном расплавлении расплава струей сжатого воздуха, что обеспечивает получение ровной поверхности.

Крупные отливки зачищаются после обрубki с помощью качающихся наждаков, перемещающихся по многорельсовому пути над зачистным конвейером или рольгангом. Отливки, имеющие сложные поверхности, зачищаются абразивными кругами, установленными на станках, называемых наждачными, и имеют один или два наждачных круга. Изменение скорости вращения абра-

зивного круга позволяет зачищать отливки на наиболее рациональных режимах. Широкое применение в массовом производстве нашли автоматические линии по зачистке отливок, имеющих форму тела вращения (шкивы, стержни, диски, барабаны) и для корпусных отливок. Для этих целей используют многошпиндельные установки с абразивными кругами.

3.2.7.5. Дефекты отливок, меры их предупреждения и способы устранения

Причины возникновения дефектов в отливках. Расплав, залитый в литейную форму, взаимодействует с ее поверхностью. В зависимости от физических и химических свойств формы протекают различного рода химические, физические взаимодействия расплавленного металла и формы, что оказывает влияние на условия кристаллизации сплава и формирование его структуры, а также на качество поверхности отливки.

Химические взаимодействия металла и формы можно разделить на процессы с участием только твердых веществ, твердых и жидких компонентов и газообразных веществ.

Наиболее интенсивно протекают процессы с участием газообразных веществ. В форме на границе с металлом возникает повышенное давление, способствующее проникновению газов в жидкий металл. Проникающий в металл газ образует внутри него пузырьки, называемые газовыми раковинами. Повышение газопроницаемости формы и снижение в ней содержания газотвердых веществ и влаги снижают количество газовых раковин в отливках. Стержни изготавливают с газоотводящими каналами или пустотелыми, что способствует беспрепятственному выходу газов из них при заполнении формы металлом.

В процессе кристаллизации в результате усадки объем металла уменьшается, а линейные размеры отливки сокращаются. Отливка сокращается неравномерно в разных по толщине стенках. Такая неравномерность кристаллизации в одной отливке вызывает появление термических напряжений в тонких ее сечениях. В затвердевшей отливке происходят сложные процессы фазовых превращений, связанные с изменениями микрообъемов внутри металла, что вызывает появление фазовых напряжений. Указанные напряжения в отливках могут суммироваться или вычитаться. Возникшие напряжения могут достигнуть такой величины, что превзойдут предел прочности металла, это приведет к появ-

лению трещин и разрушению отливок. Качество поверхности отливок зависит от свойств литейной формы и качества ее поверхности, от температуры металла, заливаемого в форму, и способа заполнения формы металлом.

Низкая поверхностная прочность литейной формы, вызванная неправильным режимом уплотнения, отступлением от состава формовочной смеси, длительным пребыванием готовой сырой песчаной формы без заполнения металлом приводит к образованию литейных поверхностных дефектов на отливках. Наиболее частым дефектом является пригар.

Поток жидкого металла оказывает тепловое и механическое воздействие на форму, размывая и разрушая ее с образованием трещин, что отражается на качестве поверхности отливок. Пригар и другие поверхностные дефекты портят не только товарный вид отливок, но и затрудняют их механическую обработку.

В литейном производстве различают следующие типы дефектов:

- раковины газовые, засорные, шлаковые, усадочные, рыхлость и пористость;
- трещины горячие, холодные и термические;
- дефекты поверхности (пригар механический и химический, спай плены, ужимы, наросты, механические повреждения;
- несоответствие размеров, массы, конфигурации отливок (недоливы, заливы), перекося, сдвиг, коробление, разностенность, искажение размеров;
- несоответствие металла отливок техническим условиям по химическому составу, макро- и микроструктуре, физико-механическим свойствам, наличие отбела (чугунное литье).

Контроль качества в литейном производстве. *Качество продукции* включает не все ее свойства, а только те, которые связаны с возможностью удовлетворения определенных потребностей в соответствии с ее назначением.

Брак — это частичное или полное несоответствие продукции требованиям, указанным в чертежах, технических условиях, стандартах.

Брак подразделяется на следующие виды:

- окончательный брак, когда литые заготовки не могут быть использованы по прямому назначению и не поддаются исправлению, т. е. исправление технически невозможно или экономически не выгодно;

- исправимый брак, когда литые заготовки могут быть использованы по прямому назначению после их исправления путем устранения имеющихся недостатков и несоответствий чертежу, техническим условиям или стандарту.

В зависимости от места обнаружения брака, его подразделяют на внутренний (в литейном цехе) и внешний (в механическом цехе).

Виды брака — это признаки, характеризующие отклонение качества отливок от требований документов.

Причины брака — это обстоятельства, вызвавшие появление дефектов.

Брак литейного производства складывается из технологического и организационного. Технологический брак — это брак, который возникает в результате неправильно выбранного технологического процесса, как результат освоения новых изделий, несовершенства методов контроля, некачественного исходного материала (шихта, исходные формовочные и стержневые смеси и др.). Организационный брак возникает в результате отступления от технологических параметров процессов плавки, формовки, выбивки, очистки и в результате отсутствия правильной организации труда.

Технический контроль — это совокупность операций и работ по проверке качества продукции и хода технологических процессов для изготовления данной продукции на всех стадиях от исходного материала до готовых изделий. Качественная литая заготовка должна иметь заданный химический состав, механические свойства, необходимую структуру, требуемые шероховатости поверхности и точность размеров.

Контроль осуществляется на всех технологических этапах. Тщательный контроль всех звеньев технологического цикла изготовления отливки и всех исходных материалов позволяет предупредить появление литейных дефектов, а если они появились, то быстро устранить причины их возникновения.

Своевременность анализа брака при использовании ЭВМ дает возможность оперативно влиять на производственный процесс и выявлять характер брака и причины его возникновения. Профилактику появления брака следует считать основным методом борьбы с ним.

При выборе литейной формы исходят из назначения, характера отливок и серийности их изготовления. Материал литейной формы должен обладать достаточной податливостью, хорошо

противостоять статическому и динамическому воздействиям жидкого металла.

При конструировании литой заготовки следует учитывать трудоемкость изготовления модели, расход формовочных и стержневых смесей.

Приливы, бобышки, фланцы, ребра жесткости и другие выступающие части детали желательно конструировать так, чтобы облегчить извлечение модели из формы.

При конструировании литой заготовки желательно предусмотреть равномерную толщину стенок в отливке, так как различные по толщине части охлаждаются неравномерно, следовательно, и уменьшение размеров их происходит с различной скоростью. Эта неравномерная усадка тонких и толстых частей отливки приводит к образованию внутренних напряжений, которые вызывают коробление отливок и трещины.

Выбор положения отливки в форме осуществляется с учетом конструктивных особенностей заготовки. Наиболее ответственные поверхности заготовки, в дальнейшем подвергающиеся механической обработке, располагаются внизу или вертикально, так как при заливке металла в форму различные шлаковые и неметаллические включения всплывают вверх. Желательно располагать всю отливку в одной полуформе, поскольку наличие зазоров между штырями и втулками опок обычно приводит к смещению полуформы, следовательно, к смещению верхней части отливки относительно нижней.

Количество разъемов формы должно быть минимальным, а поверхности, по возможности, — плоскими.

Для облегчения извлечения модели из формы стенки модели, перпендикулярные плоскости разъема, делают с уклоном в сторону разъема формы. Аналогичные уклоны делают на стенках стержневых ящиков. Формовочные уклоны выражаются обычно в градусах и зависят от способа изготовления форм и высоты поверхности, на которые назначаются уклоны.

Количество стержней должно быть минимальным. Стержни устанавливают преимущественно в нижней полуформе, в ней же расположены основные (опорные) знаки.

Чертеж отливки с техническими требованиями оформляется после окончательного выбора технологического процесса изготовления детали, по которому определяются припуски на каждую обрабатываемую поверхность.

На чертеже отливки указываются размеры заготовки с соответствующими допусками и припусками на механическую обработку, черновая (установочная) базовая поверхность, поверхность разъема формы, верх-низ при заливке, место маркировки и технические требования. Тонкими линиями наносится контур изготавливаемой детали. Уклоны и радиусы скруглений для наглядности выполняются без соблюдения масштаба.

В технических требованиях на чертеже указываются сведения, относящиеся к материалу заготовки (структура, химический состав, свойства и пр.), кроме того, следующие дополнительные требования:

- 1 Заготовка соответствует классу точности по ГОСТ ...
- 2 Литейные уклоны мм.
- 3 Литейные радиусы скруглений мм.
- 4 Твердость НВ (ГОСТ ...).
- 5 Отклонение по массе %.
- 6 Заготовка должна быть очищена от пригара (окалины), обрублена; литники, выпоры и прибыли, заусеницы (облой) удалить заподлицо.
- 7 На необрабатываемых поверхностях допускаются одиночные раковины с наибольшим измерением мм, в количестве не более штук.

Коэффициент использования материала:

$$K_{\text{им}} = (Q_{\text{детали}}/Q_{\text{заготовки}}) \cdot 100 \%$$

Форма отливки должна обеспечивать всплывание неметаллических включений и выход газов, выделяющихся при остывании отливки в результате понижения растворимости газов в металле с уменьшением его температуры.

Для удаления выделяющихся газов в конструкции литой заготовки могут быть предусмотрены специальные отверстия, что приводит к повышению ее стоимости, а в ряде случаев такое изменение конструкции заготовки неприемлемо по служебному назначению. Следует избегать выполнения в заготовке отверстий малого диаметра и большой длины:

$$d = d_0 + 0,1l,$$

где d — минимально возможный диаметр отверстия;

d_0 — минимальный диаметр, который получают в литой заготовке с минимальной толщиной стенки, мм;

l — длина отверстия.

Литые заготовки целесообразно получать со специальных централизованных заводов (центролитов), так как в этом случае улучшаются условия работы машиностроительного производства и снижается стоимость отливок.

Контрольные вопросы

1. Какие методы используются для выбивания отливок из форм и стержней из отливок?
2. Какие основные виды очистки отливок существуют? В чем заключается очистка?
3. Каковы причины возникновения дефектов и меры их предупреждения?
4. Какие основные требования предъявляются к качеству литых заготовок?

3.3. Обработка металлов давлением

3.3.1. Физические основы обработки металлов давлением

3.3.1.1. Физическая сущность пластической деформации и факторы, влияющие на пластичность металла

Обработка давлением основана на способности металлов необратимо изменять свою форму без разрушения под воздействием внешних сил. Она обеспечивает получение заготовок для производства деталей, а в некоторых случаях и самих деталей, требуемых форм и размеров с необходимыми механическими и физическими свойствами. Обработка давлением — это прогрессивный, экономичный и высокопроизводительный способ металлообработки, развивающийся в направлении максимального приближения форм и размеров заготовки к форме и размерам детали, что обеспечивает лучшее использование металла, сокращение трудоемкости последующей обработки резанием и уменьшение себестоимости продукции.

Обработке давлением подвергают около 90 % всей выплавляемой стали, 55 % цветных металлов и сплавов. Основные про-

цессы обработки металлов давлением: прокатка, волочение, прессование, ковка, объемная штамповка, листовая штамповка.

Все процессы обработки металлов давлением основаны на использовании *пластичности металла*, под которой понимают способность металла деформироваться без разрушения под воздействием внешних сил и сохранять полученную форму после прекращения этих сил.

При обработке металлов давлением различают деформацию *внутрикристаллитную* (т. е. протекающую внутри зерна) и *межкристаллитную* (т. е. протекающую по границам зерен).

В поликристаллическом металле зерна имеют различную кристаллографическую ориентацию, и деформирование каждого зерна в какой-то степени ограничено влиянием соседних зерен. Вначале пластическая деформация начинается в отдельных зернах, плоскости скольжения которых совпадают с направлением максимальных касательных напряжений. В каждом зерне скольжения происходят за счет перемещения дислокаций (линейные дефекты) последовательно: вначале по одной плоскости, затем по другой и т. д. Одновременно происходит поворот и скольжение новых зерен в положение, благоприятное для деформирования, и зерна вытягиваются в направлении интенсивного течения металла.

С дальнейшим увеличением нагрузки и возрастанием касательных напряжений пластическая деформация охватывает и другие зерна, плоскости скольжения которых не ориентированы под углом 45° к действующему усилию. В процессе обработки металлов давлением оба вида деформации протекают одновременно. Однако какой из видов деформации является преобладающим, определяется соотношением прочностей зерен и их границ при данном состоянии металла или сплава.

Проявление пластичности при обработке давлением зависит от природы металла или сплава, его химического состава, структуры, механических свойств, температуры нагрева, скорости и степени деформации, а также от схемы напряженного состояния. Чистые металлы и сплавы, образующие твердые растворы, имеют более высокую пластичность, чем сплавы, образующие химические соединения. Металлы и сплавы в однофазном состоянии, как правило, более пластичны, чем в многофазном. Пластичность литого крупнозернистого металла (слитков) ниже, чем деформированного, имеющего мелкозернистую структуру.

С повышением температуры пластичность металла повышается, а прочность, сопротивление деформации, уменьшается. Пластичность металла с увеличением скорости деформации обычно уменьшается, так как полностью не успевают завершиться процессы рекристаллизации. При этом *под скоростью деформации* понимают изменение степени деформации в единицу времени. Однако при очень больших скоростях деформации, пластичность металла вновь возрастает.

Напряженное состояние характеризуется *схемой главных напряжений* в элементарно малом объеме, выделенном в деформируемом теле. Главными называют нормальные напряжения, действующие в трех перпендикулярных площадках на которых касательные напряжения равны нулю. Прокатка, прессование, ковка, горячая объемная штамповка характеризуются схемой всестороннего неравномерного сжатия (рис. 3.9, *а*), а волочение и листовая штамповка — схемой двустороннего сжатия с односторонним растяжением (рис. 3.9, *б*).

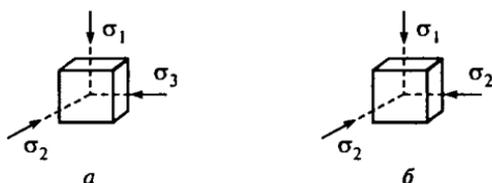


Рис. 3.9. Схемы главных напряжений: *а* — схема всестороннего неравномерного сжатия; *б* — схема двустороннего сжатия с односторонним растяжением

Нормальное напряжение определяется по формуле

$$\sigma = P/F,$$

где P — действующая сила;

F — площадь образца в поперечном сечении.

Схемы главных напряжений позволяют судить о пластичности металла, а именно, чем меньшую роль играют сжимающие силы, тем выше пластичность металла в процессе его обработки. Поэтому, например, при прессовании пластичность металла выше, чем при волочении.

Деформированное состояние в элементарно малом объеме характеризуется *схемой главных деформаций*, возникающих в направлении главных осей:

- с одной деформацией растяжения (для волочения и прессования) (рис. 3.10, *а*);

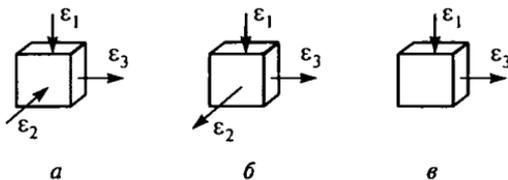


Рис. 3.10. Схемы главных деформаций: *а* — с одной деформацией растяжения; *б* — с двумя деформациями растяжения; *в* — двухосная схема деформации

- с двумя деформациями растяжения (для прокатки,ковки, объемной штамповки) (рис. 3.10, *б*);
- двухосная схема деформации возникает при прокатке широких полос и на некоторых операциях листовой штамповки (рис. 3.10, *в*).

Схема главных деформаций дает представление о характере формирования волокна и зерен, т. е. предопределяет физико-механические свойства металла при его обработке давлением.

В ряде случаев пластичность значительно повышается, а деформирующее усилие снижается при наложении на деформируемый металл ультразвуковых колебаний, а также импульсного и постоянного тока высокой плотности. Из сказанного следует, что пластичность металла не только является его свойством, но и определяется условиями обработки давлением.

3.3.1.2. Влияние холодной и горячей пластической деформации на структуру и свойства металла

Пластическая деформация металла может быть холодной или горячей. В результате холодной деформации прочностные свойства металла и твердость с ростом степени деформации увеличивается, а его пластические свойства по сравнению с отожженным металлом уменьшаются. В результате холодной обработки структура металла становится мелкозернистой и полосчатой (строчечной). Обработка давлением, выполняемая при температуре ниже температуры рекристаллизации, называется холодной, а выше температуры рекристаллизации — горячей.

При горячей обработке давлением в металле протекают одновременно процессы упрочнения и разупрочнения. Скорость процесса разупрочнения, вызванного рекристаллизацией, обычно превышает скорость процесса упрочнения. Технологический процесс обработки давлением строят так, чтобы на каждом пе-

реходе степень деформации была больше или меньше критической.

Если при холодной деформации, как правило, используют предварительно деформированные заготовки, то при горячей деформации используют металл как в литом (в виде слитков), так и в деформированном состоянии.

Основные законы пластической деформации таковы:

- *закон постоянства объема*: объем тела до деформации практически равен его объему после деформации. Этот закон используют для определения размеров заготовок, предназначенных для обработки давлением;
- *закон наименьшего сопротивления*: в случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях каждая точка этого тела перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Закон позволяет определить, какие размеры и форму поперечного сечения получит заготовка с тем или иным сечением в процессе обработки давлением;
- *закон сдвигающего напряжения*: пластическая деформация может начаться только в том случае, если сдвигающие напряжения, возникающие в деформируемом теле, достигнут определенной величины, зависящей от природы тела и условий деформации. Силы контактного трения, возникающие на поверхности соприкосновения металла с инструментом, оказывают влияние на схему напряженного состояния, пластичность и сопротивление металла деформированию. Для уменьшения вредного влияния сил трения при обработке давлением используют различные технологические смазки. При прокатке и в некоторых других случаях силы трения оказываются полезными.

Контрольные вопросы

1. На чем основана обработка металлов давлением?
2. Что такое пластичность металла и от чего она зависит?
3. Чем характеризуются напряженное и деформированное состояние металла?
4. Как влияет холодная и горячая пластическая деформация на структуру и свойства металла?
5. В чем заключаются основные законы пластической деформации?

3.3.2. Нагрев металла и нагревательные устройства

3.3.2.1. Температурный интервал обработки давлением

Металлы и сплавы перед обработкой давлением нагревают до определенной температуры для повышения их пластичности и уменьшения сопротивления деформации. Эту температуру называют температурой начала горячей обработки давлением. Область температур между началом и окончанием обработки, в которой металл или сплав обладает наилучшей пластичностью, наименьшей склонностью к росту зерна и минимальным сопротивлением деформации, называют *температурным интервалом горячей обработки давлением*. Этот интервал выбирают с учетом диаграммы состояния сплава. Температурный интервал обработки сплавов зависит от их химического состава. При нагреве металлов и сплавов выше температуры начала горячей обработки происходит интенсивный рост аустенитного зерна, которое становится тем больше, чем длиннее выдержка при высокой температуре. Сталь с такой крупнозернистой структурой называют перегретой, и она имеет пониженную пластичность при обработке давлением. Перегрев является дефектом нагрева, и его можно устранить до обработки давлением отжигом или нормализацией. При дальнейшем повышении температуры нагрева происходит расплавление легкоплавких составляющих, расположенных по границам зерен. Окисление этих границ зерен кислородом, содержащимся в составе печных газов, вызывает явление, называемое *пережогом*. Пережог металла — это неисправимый брак. Он приводит к полной потере пластичности металла.

Нагрев должен обеспечить равномерное распределение температуры по сечению и длине заготовки, минимальные обезуглероживание и образование окалины.

Во избежание образования трещин металл необходимо нагревать с определенной скоростью. Скорость нагрева представляет величину повышения температуры металла в градусах Цельсия за единицу времени. Скорость нагрева до заданной температуры зависит от теплопроводности и теплоемкости металла, размеров и формы заготовок, характера их расположения в печи. Теплопроводность стали зависит от температуры, химического состава и состояния металла.

Теплоемкость зависит от температуры и вида металла (например: железо, медь и т. п.), а для сплавов — от их химического

состава. С повышением температуры теплоемкость металлов и сплавов возрастает и достигает наибольшего значения в области температур структурных превращений. Чем больше теплоемкость, тем более длительный процесс нагрева.

3.3.2.2. Нагревательные печи и электронагревательные устройства

Нагревательные печи служат для нагрева заготовок под обработку давлением. В них теплота к заготовке поступает из окружающего ее нагретого рабочего пространства печи. Нагревательные печи классифицируются по следующим основным признакам:

- источнику энергии:
 - 1) пламенные печи, в которых теплоту получают за счет химических реакций горения топлива. Они, в свою очередь, классифицируются по роду применяемого топлива, по способу использования теплоты отходящих газов (печи рекуперативные и регенеративные) и по степени механизации;
 - 2) электрические;
- назначению: кузнечные печи, печи прокатного производства;
- принципу действия: камерные, методические. Печи, имеющие одинаковую температуру по всему рабочему пространству, называют камерными. Печи, в рабочем пространстве которых температура повышается от окна загрузки к окну выгрузки, называют методическими (применяют в прокатном производстве).

В ковочно-штамповочном производстве используют камерные, методические и полуметодические печи. Методические, полуметодические и небольшие камерные печи оборудуют рекуператорами — теплообменными аппаратами с непрерывным встречным движением отходящих печных газов и воздуха, разделенных стенкой-перегородкой. Холодный воздух подогревается в рекуператоре до температуры 300...800 °С и подается в печь для сжигания топлива. Благодаря подогреву воздуха КПД печей повышается до 40 %.

Кроме пламенных печей, для нагрева небольших заготовок из черных и цветных металлов и сплавов применяют электропечи сопротивления. При нагреве в этих печах угар значительно меньше, чем в пламенных печах. Температура в электропечах поддерживается автоматически в соответствии с заданным режи-

мом. В электронагревательных установках теплота выделяется непосредственно в заготовке. Широкое распространение в промышленности нашли установки для индукционного нагрева и контактного нагрева сопротивлением. В этих печах скорость нагрева в 8...10 раз больше, а угар металла меньше в 4...5 раз, чем при печном нагреве. Электронагрев улучшает санитарно-гигиенические условия труда благодаря отсутствию излучения и газообразования.

Контрольные вопросы

1. Что такое температурный интервал горячей обработки давлением?
2. От чего зависит скорость нагрева металла при обработке давлением?
3. По каким признакам классифицируются нагревательные печи?
4. Чем отличаются камерные печи от методических?

3.3.3. Прокатное производство

3.3.3.1. Сущность процессов прокатки и прокатные станы

Прокатка — процесс, при котором слиток или заготовка под действием сил трения втягивается в зазор между вращающимися валками прокатного стана и пластически деформируется ими с уменьшением сечения. Основные виды прокатки: продольная, поперечная и поперечно-винтовая, представлены на рис. 3.11.

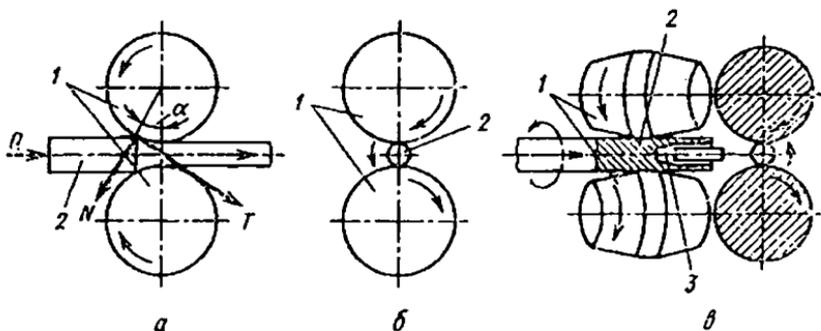


Рис. 3.11. Основные виды прокатки: а — продольная; б — поперечная; в — поперечно-винтовая: 1 — валки; 2 — заготовка; 3 — прошивень на неподвижной оправке

При *продольной* прокатке валки 1 вращаются в разные стороны, а заготовка 2 перемещается перпендикулярно осям валков, обжимается с уменьшением площади поперечного сечения и увеличением длины. При *поперечной* прокатке валки 1 с параллельными осями вращаются в одну сторону, приводя во вращательное движение заготовку 2, которая пластически деформируется вдоль валков. При *поперечно-винтовой* прокатке валки 1 расположены под углом и, вращаясь в одну сторону, придают заготовке 2 одновременно вращательное и поступательное движения вследствие чего заготовка втягивается в зазор между валками.

Форму поперечного сечения проката называют профилем, который может быть по длине изделия либо постоянным, либо переменным (периодическим). Совокупность различных профилей и их размеров называют *сортаментом*. Сортамент проката делится на следующие основные группы: сортовой прокат, листовой прокат, трубы и профили специального назначения. Сортовой прокат подразделяют на следующие виды:

- простой геометрической формы (круг, квадрат, шестиугольник, овал, треугольник);
- фасонный (уголки, швеллеры, двутавровые балки, рельсы и т. д.).

Листовой прокат толщиной свыше 4 мм называют толстолистовым, а толщиной менее 4 мм — тонколистовым. Трубы бывают бесшовные и сварные. К специальным видам проката относятся кольца, зубчатые колеса, периодические профили и др. Инструментом для прокатки служат валки, которые состоят из бочки, являющейся рабочей зоной, шеек и трефы. Листовую сталь и ленту прокатывают в гладких цилиндрических валках, полосовую — в ступенчатых, сортовую сталь — в ручьевых валках.

Вырезы — ручки в паре валков образуют калибр. Пара валков обычно имеет несколько калибров. Калибры бывают открытыми и закрытыми.

Прокатный стан, на котором прокатывают металл, состоит из одной или нескольких клетей, передаточного механизма и электродвигателя. В рабочей клетке располагают валки. Шейки валков вращаются в подшипниках, устанавливаемых в станине рабочей клетки. Для уменьшения расстояния между валками и регулирования взаимного положения их осей в верхней части станины имеется нажимное устройство с приводом от индивидуального электродвигателя, регулирующее положение верхнего валка. Крутящий момент от главного электродвигателя стана

через понижающий частоту вращения редуктор передается шестеренкой клетки, валы главных шестерен которой соединены с концами валов с помощью шпинделей и соединительных муфт.

Прокатные станы классифицируются по трем важнейшим признакам: числу и расположению валков в рабочих клетях; числу и расположению рабочих клетей; назначению.

По первому признаку рабочие клетки станов подразделяются на: дуо, трио, кварто, многовалковые и универсальные.

Клеть дуо имеет два валка. Если валки имеют постоянное направление вращения, то клеть называют нереверсивной и прокатка в ней осуществляется только в одну сторону. Такие клетки используют для прокатки заготовок, сортового материала и проволоки, а также при горячей и холодной прокатке тонких листов и лент. Если направление вращения валков после каждого прохода заготовки изменяется, клеть называют реверсивной. В этом случае заготовка прокатывается между валками несколько раз, поочередно то в одну, то в другую сторону. Дуореверсивные клетки применяют в блюмингах и слябингах, предназначенных для прокатки крупных слитков, а также в толстолистовых и некоторых других станах.

Клеть трио имеет три валка с постоянным направлением вращения каждого. Они расположены в одной вертикальной плоскости. В клетях такого типа прокатывают сортовой металл и листы. В связи с развитием процессов непрерывной прокатки станы с клетями трио все более теряют свое значение.

Клеть кварто имеет четыре валка, два из которых, меньшего диаметра, являются рабочими — приводными, а два других — опорными. Эти клетки применяют для горячей прокатки толстых плит. Нереверсивные клетки кварто используют в непрерывных станах, а реверсивные — в одноклетевых станах горячей и холодной прокатки.

Многовалковые клетки имеют шесть, двенадцать, двадцать и более валков. Рабочие валки опираются на приводные валки, а приводные — на опорные. Такая конструкция рабочей клетки обеспечивает большую жесткость и отсутствие прогиба рабочих валков. Эти клетки используют для холодной прокатки широких (200...1000 мм) и тонких листов и лент (фольги) с толщиной менее 0,2 мм.

Универсальные клетки имеют парные горизонтальные и вертикальные валки. Вертикальные валки создают боковое давле-

ние на прокатываемую полосу, ограничивая уширение, возникающее при обжатии в горизонтальных валках. Изменяя расстояние между валками, в такой клети можно получить любой прямоугольный профиль с ровными и чистыми боковыми кромками. Универсальные клети используют в слябингах, толстолистовых станах и станах для прокатки высоких широкополосных двутавровых балок. По расположению валков различают рабочие клети, в которых валки расположены горизонтально, вертикально, горизонтально и вертикально, косо. По числу рабочих клетей прокатные станы подразделяются на одно- и многоклетевые. Наиболее совершенные многоклетевые станы — станы непрерывной и полунепрерывной прокатки. Металл в них движется прямолинейно и прокатывается одновременно во всех или нескольких клетях.

По назначению прокатные станы подразделяются на станы для прокатки заготовок и для выпуска готового проката.

3.3.3.2. Производство основных видов проката

Прокатка блюмов, слябов и сортового металла. Блюмы и слябы прокатывают из слитков, поступающих с температурой поверхности 800...900 °С из сталеплавильного цеха. Перед прокаткой слитки подогревают до температуры 1300 °С в нагревательных колодцах.

Блюм — заготовка квадратного сечения размером 450 × 450...150 × 150 мм служит полуфабрикатом, который после прокатки на блюминге режется при передвижении по рольгангу мощными ножницами на мерные куски длиной 2...6 м. Дальнейшая прокатка блюмов происходит без подогрева на непрерывно-заготовочном или крупносортовом стане. Затем заготовки сечения 140 × 140...60 × 60 мм режут на мерные части. После осмотра и удаления наружных дефектов заготовки мерной длины нагревают в методических печах и прокатывают на сортовых, проволочных и других станах.

Сляб — заготовка прямоугольного сечения, предназначенная для прокатки толстого листа. Для прокатки слябов используют плоские слитки прямоугольного сечения.

Прокатка листовой стали. После нагрева слябы прокатывают в листы в две стадии. На первой стадии после одного-двух проходов сляб кантуют в горизонтальной плоскости на 90° относительно направления прокатки и прокатывают в поперечном на-

правлении до получения требуемой ширины. На второй стадии обжатый сляб вновь кантуют в той же плоскости на 90° и прокатывают на длину листа. Прокатка в двух направлениях уменьшает разницу в структуре и механических свойствах вдоль и поперек листа.

Прокатку толстолистовой стали выполняют на одноклетьевых станах трио и кварто, двухклетьевых и полунепрерывных автоматизированных станах.

Тонколистовую сталь прокатывают в горячем и холодном состояниях; так как горячую прокатку тонколистовой стали заканчивают обычно при температуре ниже температуры рекристаллизации, листы после прокатки подвергают нормализации. Горячекатаные листы, предназначенные для последующей холодной прокатки, травят для снятия окалины на травильных установках и сушат, а листы, предназначенные для холодной листовой штамповки, после отжига дополнительно обрабатывают на дрессировочных станах, правят на правильных машинах и режут на ножницах.

Дрессировка — холодная прокатка с обжатиями в пределах 0,5...3 %. Этот процесс приводит к наклепу металла. Обработанные после отжига и травления листы называют *декапированными*. После холодной прокатки материал подвергают отделочным операциям: отжигу в среде защитных газов; обрезке кромок; разрезке на мерные листы; травлению; полированию и др. Иногда после отжига листы дрессируют.

Прокатка бесшовных труб. В качестве заготовок для производства используют круглые и граненые слитки, а также катаные заготовки. Процесс прокатки состоит из двух основных операций: прошивки отверстия в слитке или заготовке и прокатки прошитой заготовки.

Прошивку выполняют на прошивном стане поперечно-винтовой прокатки, двумя конусообразными рабочими валками, оси которых скрещиваются под углом $\alpha = 6...12^\circ$. В валках такого стана заготовка получает одновременно вращательное и поступательное движение. При этом в заготовке возникают радиальные растягивающие напряжения, вызывающие течение металла от ее центра к периферии. В результате металл в центре заготовки доводится до состояния разрыхления, и заготовка сравнительно легко прошивается прошивнем с образованием трубной заготовки — гильзы.

Для получения трубы трубную заготовку устанавливают на оправку и подают на пилигримовый стан. Рабочие валки этого стана вращаются в разные стороны с одинаковой скоростью. При этом направление вращения валков обратно направлению подачи заготовки. Валки имеют переменный профиль, вследствие чего размеры калибра в свету непрерывно изменяются при каждом обороте валков.

Прокатку прошитых заготовок на автоматическом стане производят на неподвижной оправке в круглых калибрах. Толщина стенки трубы зависит от просвета между калибром и оправкой. При получении требуемой толщины стенки наружный диаметр трубы уменьшается. Для устранения неровностей, ризок, овальности и неравномерной толщины стенок полученную трубу обкатывают на раскатной машине и для доводки до заданного диаметра пропускают через калибровочный стан.

Прокатку прошитой заготовки на непрерывном стане выполняют на оправке.

Производство сварных труб. Сварные низкоуглеродистые и низколегированные стальные трубы изготавливают из прокатных полос, называемых штрипсами, или листов. По сравнению с бесшовными сварные трубы изготавливают с более тонкой стенкой и меньшими отклонениями по ее толщине. Процесс изготовления сварных труб состоит из операций: свертывание заготовки в трубу, сварки (электрической, газовой, газозлектрической), правки, калибровки и отделки. В настоящее время получил распространение метод изготовления труб свертыванием полосы по спирали на автоматическом трубосварочном стане. Их прочность на 40...60 % выше, чем труб с прямым швом.

Производство специальных видов проката. Профили специального назначения и отдельные виды изделий получают прокаткой на специальных станах. Существуют станы для раскатки железнодорожных колес, для прокатки вагонных осей, заготовки шатунов двигателей, роликов, ребристых труб и других изделий и заготовок.

Производство гнутых профилей. Такие профили изготавливают в холодном состоянии на роликовых профилегибочных станах при последовательном прохождении горяче- и холоднокатаной полосы или ленты через несколько вращающихся фасонных роликов. Эти ролики обеспечивают получение гнутых профилей открытого, полузакрытого и закрытого типов, а также профилей с наполнителями. Гнутые профили имеют толщину стенки ме-

нее 2...3 мм и сложную форму, которые невозможно получать горячей прокаткой. Кроме того, при одинаковой прочности они легче горячекатаных профилей.

Контрольные вопросы

1. Что такое прокатка?
2. Какие основные виды прокатки существуют? Какова их сущность?
3. Что такое сортамент проката?
4. Что собой представляют прокатные станы? Приведите их классификацию.
5. Какие основные виды проката существуют?
6. Каким образом получают бесшовные и сварные трубы?

3.3.4. Волочение и прессование

3.3.4.1. Волочение

Волочение — процесс протягивания заготовки через постепенно сужающееся отверстие в инструменте, называемом волокой. При этом поперечное сечение заготовки уменьшается, а ее длина увеличивается (рис. 3.12). Волочение выполняется в холодном состоянии. Его применяют для получения проволоки диаметром 10...0,002 мм тонкостенных труб, фасонных профилей, а также для калибровки, т. е. придания точных размеров и высокого качества поверхности изделий.

Разрезкой фасонных профилей получают готовые детали — шпонки, направляющие и т. д.

В зависимости от назначения волочильные станы разделяют по способу осуществления тяги на барабанные, цепные и гидравлические. Новые конструкции волочильных станов с гидравлической тягой в отличие от цепных работают более плавно и с меньшим числом обрывов заготовок.

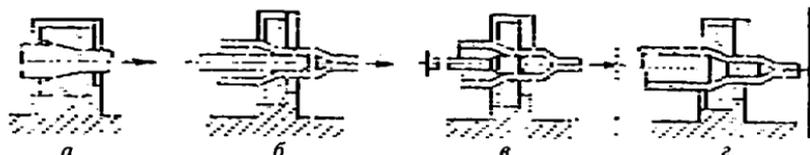


Рис. 3.12. Схемы волочения: а — прутка; б — трубы; в — на неподвижной оправке; г — без неподвижной оправки

3.3.4.2. Прессование

Прессование — процесс выдавливания металла заготовки из замкнутой полости инструмента-контейнера через отверстие матрицы с площадью меньшей, чем площадь поперечного сечения заготовки. Профиль выдавливаемого изделия можно получить разнообразной формы. Для прессования используют черные и цветные металлы и сплавы в виде слитков, литых или предварительно деформированных кованных или катаных заготовок диаметром до 500 мм и более и длиной до 1200 мм. Черные металлы и сплавы прессуют в горячем состоянии, цветные — как в горячем, так и в холодном состоянии. При прессовании металл подвергается всестороннему неравномерному сжатию, и поэтому он должен обладать высокой пластичностью. В этих условиях для прессования металла требуются большие усилия. Выполняют его двумя методами: прямым и обратным (рис. 3.13).

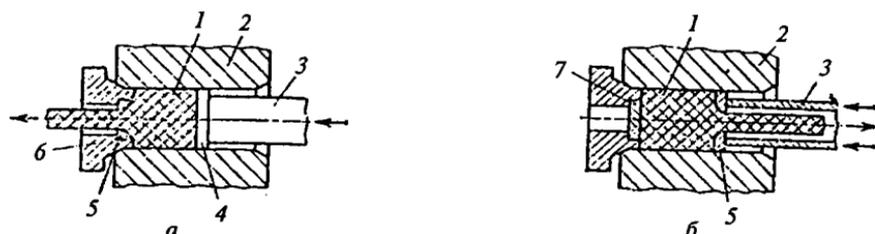


Рис. 3.13. Схема прессования: а — прямое; б — обратное: 1 — заготовка; 2 — контейнер; 3 — пуансон; 4 — пресс-шайба; 5 — матрица; 6 — матрица-держатель; 7 — шайба

При прямом методе прессования металл, помещенный в полость контейнера, выдавливается через матрицу из контейнера.

При обратном методе прессования, контейнер закрыт с одного конца упорной шайбой, а давление прессы через полый пуансон с укрепленной на нем матрицей передается на заготовку — металл, который течет навстречу движению матрицы с пуансоном.

Прессованием получают прутки диаметром 3...250 мм, трубы диаметром до 800 мм с толщиной стенки от 1,5 мм и более, а также изделия из малопластичных, трудноформуемых сталей и сплавов, которые нельзя получить другими способами обработки давлением. Процесс прессования высокопроизводителен и во многих случаях конкурирует с прокаткой. Прессование выпол-

няют на вертикальных и горизонтальных высокомеханизированных или автоматизированных гидравлических прессах усилием до 250 МН.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность волочения?
2. В чем заключается процесс прессования?
3. Для чего применяют волочение и прессование?

3.3.5. Ковка

3.3.5.1. Основные операции и технологический процессковки

Ковка — процесс горячей обработки давлением, при котором путем многократного воздействия универсального подкладного инструмента или бойков металл заготовки пластически деформируется, постепенно приобретая заданные форму, размеры и свойства. Ковкой получают поковки массой от десятков грамм до сотен тонн для изготовления деталей машин резанием. Различают ковку ручную, применяемую иногда при мелких ремонтных работах и выполняемую с помощью наковальни и кувалды, и машинную, осуществляемую с помощью молотов и прессов.

Применяемый для обработки кузнечный инструмент разделяют по функциональному назначению на основной, т. е. непосредственно деформирующий металл и вспомогательный, предназначенный для удержания заготовки и манипулирования им в процессековки. Основные операцииковки: осадка, протяжка, пробивка, промывка, гибка, скручивание, отрубка и кузнечная сварка.

Осадка — уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения. Производят бойками или осадочными плитами.

Высадка — осадка части заготовки.

Протяжка — удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения. Она осуществляется последовательным обжатием отдельных примыкающих друг к другу участков заготовки при ее подаче вдоль оси. Разновидно-

сти протяжки: раскатка-увеличение диаметра кольцевой заготовки при вращении за счет уменьшения ее толщины с помощью бойка или оправки; протяжка на оправке — увеличение длины прошитой или просверленной заготовки за счет обжатия ее по обе стороны оправки двумя бойками (нижним вырезным и верхним плоским или обоими вырезными бойками).

Гибка — образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы. Осуществляют с помощью различных опор, приспособлений и в подкладных штампах.

Скручивание — поворот части заготовки вокруг продольной оси. Осуществляют с помощью крана вилками.

Отрубка — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем внедрения в заготовку деформирующего инструмента. Осуществляют топорами.

Пробивка — образование в заготовке отверстия с удалением материала в отход путем сдвига.

Прошивка — получение полостей в заготовке за счет вытеснения материала.

Кузнечная сварка — образование неразъемного соединения под действием давлений в пластическом состоянии.

Технологический процесс ковки представляет собой совокупность операций непосредственно связанных с изменением формы исходной заготовки, ее свойств и состояния, а также с транспортированием от момента поступления заготовки в обработку до получения поковки, форма и сложность поковки определяют выбор необходимых операций ковки и рациональную последовательность их выполнения. Далее предусматривают необходимые для ковки инструменты, приспособления и выбирают основное и вспомогательное оборудование для ковки. В зависимости от марки стали назначают температурный интервал ковки, выбирают режимы нагрева слитка или заготовки и охлаждения поковки, а также нагревательную печь.

3.3.5.2. Оборудование для ковки

В зависимости от массы и размеров сечения поковки, ее изготавливают на молоте или на прессе. Основной характеристикой ковочного молота является масса падающих частей, а пресса — усилие, которое он может развивать. При ковке на молоте

металл деформируется за счет кинетической энергии падающих частей, накопленной к моменту соударения с заготовкой. Существуют следующие виды молотов дляковки:

- пневматические, их используют дляковки мелких поковок. Молот имеет два цилиндра: компрессорный и рабочий. Сжатый в компрессорном цилиндре воздух через воздухо-распределительное устройство направляется вверх или вниз рабочего цилиндра, перемещая соответственно поршень, изготовленный заодно с бабой. Поршень компрессорного цилиндра приводится в возвратно-поступательное движение от электродвигателя через редуктор посредством кри-вошипно-шатунного механизма;
- паровоздушные двойного действия, их используют дляковки мелких и средних по массе поковок. Они приводятся в действие паром, поступающим по паропроводу от котла под давлением 700...900 кПа, или сжатым воздухом, который подается по трубопроводу от компрессора под давлением до 700 кПа. Их называют двойного действия потому, что воздух или пар поступают в рабочий цилиндр поочередно для подъема и опускания падающих частей.

Гидравлические ковочные прессы используют для изготовления средних и крупных по массе поковок. Принцип действия их заключается в следующем. Гидравлический пресс имеет нижнюю неподвижную поперечину, которая крепится на фундаменте. На нижней поперечине установлен подвижной стол с нижним бойком. Стол приводится в движение от гидроцилиндра, четыре стальные колонны связывают нижнюю и верхнюю неподвижные поперечины, на последней укреплены рабочий и возвратные цилиндры. В этих цилиндрах реализуется, соответственно, рабочий и возвратный плунжеры. Рабочий плунжер скреплен с подвижной поперечиной, к которой крепится верхний боек. Плунжеры возвратных цилиндров соединены с траверсой, которая тягами, в свою очередь, соединена с подвижной поперечиной. Холостой ход производится жидкостью низкого давления, которая поступает в рабочий цилиндр из наполнительного бака. При рабочем ходе в рабочий цилиндр прессы подают жидкость (водную эмульсию или минеральное масло) высокого давления (20...45 МПа).

На гидравлических ковочных прессах куют поковки из слитков массой до 500 т.

Ударный характер приложения нагрузки при ковке на молоте вызывает повышенную утомляемость рабочих и создает сотря-

сение грунта, вследствие чего необходимо устройство громоздких фундаментов. Прессы не требуют таких больших и тяжелых фундаментов.

Многие операции при ковке механизированы. Имеются автоматизированные ковочные комплексы, включающие гидропресс, а также ковочные и инструментальные манипуляторы, работающие по заданной программе. Механизация и автоматизация повышают производительность кузнечного оборудования, улучшают качество выпускаемых поковок и облегчают труд работающих.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается процессковки?
2. Какие основные операцииковки существуют?
3. Каков технологический процессковки?
4. Какое оборудование применяют при ковке?

3.3.6. Горячая объемная штамповка

3.3.6.1. Сущность процесса и способы объемной штамповки

Объемная штамповка — придание заготовке заданной формы и размеров путем заполнения материалом рабочей полости штампа. Полость штампа, которую заполняет металл при штамповке, называют ручьем. Объемная штамповка наиболее эффективна при крупносерийном и массовом изготовлении поковок. По сравнению с ковкой штамповка позволяет получить с большей производительностью и меньшим расходом металла поковки более сложной формы и с лучшим качеством поверхности. По способу изготовления поковок горячую объемную штамповку разделяют на штамповку в открытых штампах и штамповку в закрытых штампах.

Открытыми называют штампы, в которых вдоль всего внешнего контура штамповочного ручья в плоскости разреза сделана заусенечная канавка. При штамповке она имеет следующее значение. Во-первых, в нее вытекает избыточный объем металла заготовки. Во-вторых, при соударении верхней и нижней половин штампа заусенец, находящийся в канавке, предохраняет их

от жесткого удара, что способствует продлению срока службы штампа. В-третьих, мостик заусенечной канавки в виде узкой щели создает в конце штамповки большое сопротивление ручья штампа. Этому же способствует и быстрое остывание заусенца.

Закрытыми называют штампы, в которых металл заготовки деформируется в замкнутой полости. Штамповку в них производят без заусенца. Для этой штамповки характерны следующие особенности: заготовка должна быть достаточно точной по объему, поскольку заусенец не предусматривается; макроструктура поковки весьма благоприятна, так как процесс формирования поковки в полости штампа протекает так, что волокна обтекают ее контур и после нигде не перерезаются. Расход металла меньше, чем при штамповке в открытых штампах. Чем сложнее поковка по форме и чем больше она отличается от формы заготовки, тем большее число ручьев в штампах и переходов (это обработка заготовки в одном ручье штампа) штамповки требуется для ее изготовления.

Ручьи в штампах разделяют на заготовительные и штамповочные. Ручьи, предназначенные для перераспределения металла заготовки с целью приближения ее формы к форме штампованной поковки, называют заготовительными. Ручьи для получения окончательно оформленной поковки называют штамповочными. Их подразделяют на ручьи предварительной и окончательной штамповки.

Технологический процесс изготовления штампованной поковки состоит в общем случае из следующих основных операций:

- разделка проката на мерные заготовки;
- нагрев;
- штамповка;
- обрезка заусенцев;
- термическая обработка;
- очистка от окалины;
- правка;
- калибровка.

Проектирование технологического процесса штамповки включает:

- выбор способа штамповки;
- составление чертежа поковки;
- выбор переходов штамповки;
- определение мощности штамповочного оборудования (массы падающих частей молота или усилия пресса);

- конструирование штампов;
- выбор способа и разработку режимов нагрева;
- определение вида отдельных операций и технико-экономических показателей разработанного прессы.

Чертеж поковки составляют по чертежу готовой детали в такой последовательности: выбирают поверхность разреза штампов, т. е. решают вопрос о том, какая часть поковки будет находиться в верхней или нижней частях штампа; по стандарту назначают припуски, допуски, напуски, штамповочные уклоны, радиусы закруглений; указывают основные технические условия на поковку. Штамповочные уклоны в виде напусков делают на поковках для облегчения их выемки из штампов (обычно для внутренних уклонов — не более 10° , для внешних — не более 7°). Объясняется это тем, что в процессе остывания наружные поверхности поковки отходят от стенок штампа, а внутренние — охватывают выступы штампов. Для лучшего заполнения металлом углов поволоков и уменьшения износа штампов переходы их поверхностей скругляют радиусами.

3.3.6.2. Штамповка на молотах и прессах

Штамповка на молотах. Наиболее распространена штамповка на паровоздушном штамповочном молоте двойного действия. По принципу действия он аналогичен ковочному молоту. Отличается штамповочный молот от молота двойного действия дляковки большей длиной направляющих для движения бабы и большей точностью регулирования усиленных направляющих. Жесткая конструкция молота обеспечивает более полное использование энергии удара и большую точность штамповки. Ковочным паровоздушным молотом управляет машинист, а штамповочным — непосредственно кузнец штамповщик. В зависимости от степени нажатия на педаль молот совершает удары различной силы. Паровоздушные штамповочные молоты изготавливают с массой падающих частей 0,5...35 т.

Широкое применение для штамповки находят бесшаботные молоты с двусторонним встречным ударом баб. Фундаменты таких молотов в 8...10 раз меньше, чем фундаменты паровоздушных молотов. Эти молоты могут быть либо с одним паровоздушным цилиндром для движения верхней бабы, которая через соответствующие тяги синхронно приводит в движение нижнюю бабу, либо с двумя цилиндрами для синхронного привода баб, т. е. с не-

зависимым приводом нижней бабы. К недостаткам бесшаботных молотов относят некоторые неудобства работы при движении обеих баб, поэтому их используют для одноручевой штамповки.

На штамповочных молотах штамповка производится в закрытых и открытых штампах. Ручьи в штампах имеют различное назначение.

Заготовительные ручьи. Протяжной ручей выполнен в виде бойков и предназначен для увеличения длины отдельных участков заготовки за счет уменьшения площади ее поперечного сечения. Подкатной ручей предназначен для местного увеличения сечения заготовки за счет уменьшения сечения соседних участков. Пережимной ручей аналогичен по форме подкатному и предназначен для местного уширения заготовки в плоскости, перпендикулярной к деформирующей силе. В пережимном ручье металл заготовки в осевом направлении почти не перемещается. Заготовка обрабатывается в нем без кантовки за один-два удара и без перемены положения переносится в окончательный ручей. Формовочный ручей предназначен для придания заготовке формы, соответствующей форме поковки в плоскости разъема. В этом ручье заготовку не кантуют, а ее поперечные сечения изменяются по площади незначительно, перемещение металла вдоль оси невелико. Из формовочного ручья заготовку переносят в предварительный или окончательный ручей с поворотом вокруг оси на 90° . Гибочный ручей предназначен для изгиба заготовки в соответствии с формой поковки в плане. Для осадки заготовки в торец до требуемых размеров по высоте и диаметру имеется площадка для осадки; применяется при штамповке поковок, имеющих в плане форму круга или близкую к нему. Осадку выполняют за один или несколько ударов. Отрубной ручей служит для отделения поковки от прутка.

Штамповочные ручьи. Предварительный (черновой) ручей предназначен для максимального приближения формы поковки к окончательной форме. Он не имеет заусенечной канавки, несколько глубже и уже, чем чистовой ручей, и имеет большие радиусы скруглений. Заготовка из предварительного ручья свободно укладывается в чистовом ручье и при штамповке обеспечивает его хорошее заполнение.

Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП). КГШП изготавливают усилием 5...100 МН. Они успешно заменяют и во многих случаях превосходят паровоздушные штамповочные молоты с массой подающих частей до 10 т.

КГШП не требуют громоздких фундаментов и в сочетании с индукционным нагревом улучшают условия труда в цехе. Для КГШП характерно, что усилие, возникающее при штамповке, воспринимается массивной станиной. На станине пресса установлен электродвигатель, на валу которого закреплен шкив, от которого крутящий момент через клиноременную передачу передается маховику, закрепленному на приемном валу. На другом конце этого вала насажено малое зубчатое колесо, находящееся в зацеплении с большим зубчатым колесом со встроенной в него пневматической муфтой включения. Большое зубчатое колесо с муфтой расположено на коленчатом валу, который при вращении приводит в движение шатун с ползуном в направляющих. Для быстрой остановки кривошипно-ползунного механизма после выключения муфты на другом конце коленчатого вала установлен тормоз. Остановка маховика тормозом проводится при выключенном электродвигателе.

В отличие от молотов прессы имеют жесткий график движения ползуна, полный ход которого вверх и вниз одинаков и равен удвоенному радиусу кривошипа. В связи с этим при многоручье-вой штамповке невозможно применить протяжной, подкатной и отрубной ручки. Поковки, требующие использования указанных ручьев, штампуют на КГШП из заготовок периодического проката или предварительно фасонированных на ковочных вальцах. Постоянство величины хода ползуна, большая точность его движения в мощных регулируемых направляющих станины прессы, применение штампов с направляющими колонками и выталкивателями для принудительного удаления поковок обеспечивают большую точность изготовления поковок, с меньшими штамповочными уклонами, припусками, допусками и расходом металла, чем при штамповке на молотах. КПД прессы примерно в два раза выше КПД молотов. Штамповка на прессы в 1,5...3 раза производительней, чем на молоте, и ее легче механизировать и автоматизировать.

Штамповка на винтовых прессы с дугогетаторным приводом. В этих прессы действие привода ползуна основано на использовании вращающегося электромагнитного поля, создаваемого не круговыми, как в обычных электродвигателях, а дуговыми статорами, которые приводят во вращение короткий замкнутый ротор — маховик и связанный с ним винт, который перемещает вверх или вниз гайку с ползуном. Их преимущество в том, что они допускают перегрузку. Скорость движения ползуна 0,5...0,9 м/с,

поэтому производительность штамповки на них низкая. Однако этот недостаток становится преимуществом при штамповке поковок из сплавов, чувствительных к высоким скоростям деформации. Винтовые прессы с дугостаторным приводом вытесняют в настоящее время винтовые фрикционные прессы вследствие более высокой надежности и долговечности.

Штамповка на гидравлических штамповочных прессах. Гидравлические штамповочные прессы рассчитаны на усилие до 750 МН. По сравнению с ковочными они имеют более жесткую конструкцию, несколько большую скорость перемещения подвижной поперечины, увеличенную площадь стола и выталкивателя для удаления отштампованных изделий. Их используют для штамповки крупногабаритных плоских и объемных поковок массой до 5 т.

3.3.6.3. Штамповка на горизонтально-ковочных и специальных машинах

Горизонтально-ковочная машина (ГКМ) предназначена для штамповки поковок типа стержней с утолщениями на концах, втулок, колец и т. п. Преимущества перед штамповкой на молотах и прессах — более высокая производительность, возможность штамповки без заусенца, получение поковок типа колец без отхода металла на образование отверстия при пробивке и обеспечение хорошей волокнистой макроструктуры. Для штамповки используют сортовой прокат круглого сечения и трубы; штамповку выполняют из штучных заготовок или прутка, при этом каждую поковку отделяют от прутка в штампе.

Штамп имеет три части: неподвижную матрицу в гнезде станины, подвижную матрицу в подвижной щеке и пуансоны, закрепленные в главном ползунке машины. Штампруемый пруток подается до упора и зажимается матрицей. Штамп имеет разъем по двум взаимно перпендикулярным плоскостям, благодаря чему напуски на поковках и штамповочные уклоны малы или отсутствуют. При движении пуансона навстречу матрицам форма поковки получается в результате заполнения металлом полости сомкнутых матриц. При обратном ходе машины пуансон и подвижная матрица возвращаются в исходное положение, и поковку извлекают из ручья. Штамповка осуществляется обычно за несколько переходов в ручьях, оси которых расположены одна над другой. Каждому переходу соответствует один рабочий ход машины.

Проектирование технологического процесса штамповки поковок на ГКМ выполняют с учетом основных правил высадки, исключая возникновение продольного изгиба и брак по зажимам.

Ротационно-ковочные машины предназначены для протяжки путем обжатия в холодном или горячем состоянии сплошных круглых и квадратных заготовок и труб периодически сходящимися бойками. По длине изделия можно получить переменные форму и размеры. Высокая точность (0,1...0,3 мм) и качество поверхности во многих случаях исключают необходимость в последующей обработке изделий резанием. Принцип действия машины основан на том, что при вращении шпинделя бойки скользят в пазах шпинделя по роликам, помещенным в обойме, и ударяют по заготовке. После каждого удара бойки отбрасываются от заготовки центробежной силой. В машинах другого типа бойки не вращаются и приводятся в соударение с заготовкой от вращающейся обоймы с роликами. Бойки возвращаются в исходное положение под действием возвратных пружин. Эти машины используют для протяжки квадратных заготовок. Современные машины работают автоматически по заданной программе и совершают до нескольких тысяч ударов в минуту.

Контрольные вопросы

1. Что такое объемная штамповка, открытые и закрытые штампы?
2. Каков технологический процесс изготовления штампованной поковки?
3. Каков технологический процесс штамповки на молотах?
4. Для чего служат ручки в штампе?
5. В чем преимущество штамповки на кривошипных прессах?
6. Как получают поковки на горизонтально-ковочных машинах?
7. Для чего используются ротационно-ковочные машины?

3.3.7. Холодная штамповка

3.3.7.1. Выдавливание и высадка

Выдавливание — образование заготовки путем пластического течения материала в полости штампа. Материалом для выдавливания служат цветные металлы и сплавы, а также стали в виде за-

готовок, из сортового и листового проката. Выдавливание осуществляется в штампах на механических и гидравлических прессах прямым, обратным и комбинированным способом (рис. 3.14).

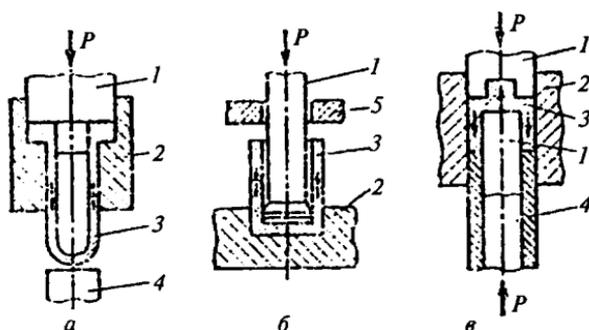


Рис. 3.14. Методы холодного выдавливания: *а* — прямой; *б* — обратный; *в* — комбинированный: 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — изделие; 4 — выталкиватель; 5 — съемник

При прямом способе течение металла выдавливаемой заготовки совпадает с направлением движения пуансона, а при обратном — противоположно направлению движения пуансона. При комбинированном способе часть металла заготовки течет по направлению движения пуансона, а другая часть — навстречу движению пуансона. Из-за высокой стоимости штампов выдавливание целесообразно применять в условиях крупносерийного и массового производства. Оно обеспечивает высокую производительность и точность изготовления разнообразных деталей.

Холодная высадка — образование местных утолщений на заготовках, например, головок заклепок (рис. 3.15). Ее выполняют на

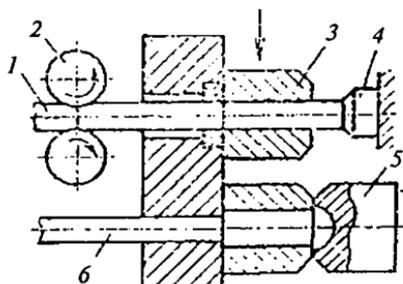


Рис. 3.15. Схема штамповки на холодновысадочном одноударном автомате: 1 — пруток; 2 — ролики; 3 — матрица; 4 — упор; 5 — пуансон; 6 — толкатель

холодновысадочных автоматах. В первом переходе ролики 2 подают прутки 1 до упора 4, после чего матрица 3 перемещается на позицию высадки, отрезая от прутка мерную заготовку. Во втором переходе ударом высадочного пуансона 5 производится высадка головки. После возвращения пуансона в исходное положение заклепка выталкивается толкателем 6, который также возвращается в исходное положение, а матрица вновь уходит на линию передачи. Высадку выполняют на одно-, двух- и трехударных автоматах, производительность которых достигает 400 изделий в минуту. По сравнению с изготовлением резанием высадка обеспечивает до 30...40 % экономии металла.

3.3.7.2. Холодная листовая штамповка

Листовая штамповка — способ изготовления плоских и объемных тонкостенных изделий из листов, полос или лент с помощью штампов на прессах или без их применения (беспрессовая штамповка). Она характеризуется высокой производительностью, стабильностью качества и точности, большой экономией металла, низкой себестоимостью изготавливаемых изделий и возможностью полной автоматизации.

Все операции листовой штамповки делят на две группы:

- разделительные, в результате которых происходит отделение одной части заготовки от другой по заданному контуру;
- формоизменяющие, предназначенные для получения изделия пространственной формы путем пластической деформации.

Отрезка — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига. Отрезку осуществляют на ножницах различных типов и в штампах на прессах.

Вырубка — полное отделение заготовки или детали от листовой заготовки по замкнутому контуру путем сдвига.

Пробивка — образование в заготовке сквозных отверстий и пазов с удалением материала в отход путем сдвига. Для экономии металла величина технологических перемычек между вырубаемыми изделиями соответствует примерно толщине металла.

Гибка — образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы. В местах изгиба наружные слои заготовки растягиваются, а внутренние — сжимаются. Между ними расположен нейтральный слой, не испытывающий ни сжатия, ни растяжения. По развернутой длине

нейтрального слоя определяют длину заготовки до гибки. Гибка осуществляется в результате упруго-пластической деформации, при которой наряду с пластической деформацией происходит значительная упругая деформация металла. Поэтому после гибки растянутые и сжатые слои стремятся возвратиться в исходное положение под действием упругих сил. Вследствие этого форма детали после гибки не будет соответствовать форме металла до нее на величину угла пружинения, который необходимо учитывать при изготовлении инструмента.

Вытяжка — образование полой заготовки или детали из плоской или полой листовой заготовки. При вытяжке без утонения стенки вырубленную заготовку давлением пуансона втягивают в отверстие матрицы.

Отбортовка — образование борта по внутреннему или наружному контуру листовой заготовки. При отбортовке отверстия металл в зоне деформации растягивается и истончается.

Обжим — уменьшение периметра поперечного сечения полой заготовки. В очаге деформации толщина стенки изделия несколько увеличивается.

Рельефная формовка — образование рельефа в листовой заготовке с ее местным деформированием.

3.3.7.3. Инструмент и оборудование для листовой штамповки

В качестве инструмента при холодной листовой штамповке используют штампы. Они состоят из блоков деталей и рабочих частей — матриц и пуансонов. Рабочие части непосредственно деформируют заготовку. Детали блока (верхняя и нижняя плиты, направляющие колонки и втулки) служат для опоры, направления и крепления рабочих частей штампа. По технологическому признаку различают штампы простого, последовательного и совмещенного действия.

В *штампе простого действия* за один ход ползуна выполняется одна операция, и поэтому его называют однооперационным.

В *штампе последовательного действия* за один ход ползуна выполняются одновременно две или большее число операций в различных позициях, а заготовка после каждого хода пресса перемещается на шаг подачи.

В *штампе совмещенного действия* за один ход ползуна пресса две и большее число операций выполняются в одной позиции без перемещения заготовки в направлении подачи.

Штампы последовательного и совмещенного действия называют многооперационными. Они производительнее однооперационных, но сложнее и дороже в изготовлении. Их используют в крупносерийном и массовом производствах.

Холодную листовую штамповку осуществляют в основном на кривошипных прессах. По технологическому признаку выделяют механические прессы простого, двойного и тройного действия (соответственно одно-, двух-, трехпозиционные).

Пресс двойного действия предназначен для глубокой вытяжки крупных деталей. Он имеет два ползуна — внутренний с приводом от кривошипа и наружный с приводом от кулачков, закрепленных на валу.

Современные листоштамповочные прессы оснащены устройствами для автоматической подачи полосы или ленты в штамп, а в случае штамповки из штучных заготовок — устройствами для захвата, ориентации и подачи.

В условиях единичного и мелкосерийного производства, когда неэкономично применять сложные штампы, листовую штамповку выполняют не на прессах, а на специальных установках. В установках для *штамповки жидкостью* листовой металл укладывается на жесткую матрицу; он деформируется давлением жидкости до 20 МПа, подаваемой от насоса в резиновый мешок, играющий роль пуансона. При этом верхнюю часть мешка прочно прижимают массивной крышкой. Этот способ применяют для вытяжки полых деталей.

В установках для *штамповки взрывом* заготовка принимает форму штампа под действием энергии взрыва, создающего высокое давление. Взрывная волна с большой скоростью может передаваться на деформируемый металл либо через газовую среду, либо через воду. Этим способом осуществляют как формоизменяющие, так и разделительные операции. При штамповке взрывом труднодеформируемых и малопластичных в обычных условиях сплавов значительно повышается их пластичность.

В *электрогидравлических установках* энергоносителем является высоковольтный электрический разряд в жидкости, который вызывает появление ударной волны, используемой для штамповки.

В промышленности используют и другие прогрессивные способы беспрессовой листовой штамповки, например, *магнитно-импульсный способ*.

В цехах холодной обработки металлов давлением, в частности, при листовой штамповке, во избежание травматизма рук в опасной зоне штампа устанавливают рукоотстранители, срабатывающие в момент рабочего хода ползуна прессы. Чаще используют принцип занятости рук, состоящий в одновременном нажатии обеими руками двух пусковых кнопок. Иногда применяют фотоэлементы, лучи которых проходят по опасной зоне, при пересечении их руками ползун прессы останавливается. В последнее время в таких цехах устанавливают машины-автоматы и с успехом используют промышленных роботов.

Контрольные вопросы

1. Какова сущность процесса получения заготовки выдавливанием?
2. Для чего используется холодная высадка?
3. Чем характеризуется способ листовой штамповки?
4. Какие существуют основные операции при листовой штамповке?
5. Какой инструмент используют при холодной листовой штамповке?
6. В чем заключаются штамповка жидкостью и штамповка взрывом?

3.3.8. Контроль качества изделий, новые направления обработки металлов давлением

3.3.8.1. Отделочные операции и контроль качества изделий

Процесс отделки проката в общем случае включает операции горячей резки, охлаждения, правки, холодной резки на мерные части, удаление поверхностных дефектов и зависит от вида продукции.

Например, рельсы после резки изгибают в сторону подошвы для компенсации обратного изгиба при охлаждении по специальному режиму. После этого рельсы правят, фрезеруют торцы, сверлят отверстия и закаливают для повышения износостойкости.

Толстые листы правят в горячем состоянии, обрезают на заданные размеры, чистят поверхность и термически обрабатывают.

Тонкие листы в случае термической обработки без защитной атмосферы травят, полируют, обрезают и дрессируют.

После волочения или прессования прутки, трубы и проволоку подвергают термической обработке, правят, шлифуют или полируют, разрезают на мерные части и смазывают антикоррозионным составом. Горячепрессованные профили подвергают, кроме того, очистке от окалины и остатков технологических смазочных материалов.

Процесс отделки поковок после горячей объемной штамповки состоит из операций обрезки заусенца и пробивки пленки, термической обработки, очистки от окалины, а иногда — правки и калибровки.

В зависимости от марки стали, размеров и назначения поковки подвергают термической обработке с целью устранения неоднородности структуры металла, возникшей послековки, штамповки и охлаждения, улучшения его механических свойств и обрабатываемости резанием, а также снятия опасных внутренних напряжений. Для повышения производительности термической обработки в отдельных случаях ее выполняют с использованием ковочной теплоты, т. е. сразу после штамповки горячую поковку передают в термическую печь. Правка поковок необходима для устранения искривлений, возникающих при обрезке заусенца, термической обработки и т. п.

Правку выполняют в штампах и приспособлениях на молотах и прессах. Горячую правку проводят после обрезки заусенца в окончательном ручье ковочного штампа, холодную правку выполняют в правочных штампах после термической обработки и очистки поковок от окалины.

Очистку поковок от окалины выполняют в галтовочных барабанах (для мелких поковок), дробью, выбрасываемой на поковку лопатами быстровращающейся турбинки или струей сжатого воздуха, травлением в водных растворах кислот. Очистку от окалины выполняют для уменьшения износа режущего инструмента и облегчения контроля поверхности поковок; очистка необходима перед холодной правкой и калибровкой во избежание влияния окалины на поковку.

Калибровку выполняют для повышения точности и уменьшения шероховатости поверхности поковок. Различают калибровку плоскостную и объемную. Плоскостную калибровку выполняют в холодном состоянии для получения точных вертикальных размеров поковки на одном или нескольких участках. Объемную калибровку производят для получения более точной формы поковки с ужесточением размеров в вертикальной и го-

горизонтальной плоскостях. Объемную калибровку выполняют как в горячем, так и в холодном состоянии.

Контроль качества осуществляют на всех этапах производства изделий. Окончательный контроль может предусматривать их внешний осмотр, контроль геометрической формы и размеров, выявление поверхностных и внутренних дефектов, структуры и определение механических свойств металла.

Процесс отделки изделий после холодной штамповки включает очистку заусенцев, обезжиривание, промывки, сушку, полирование, окрашивание или нанесение специальных покрытий. Иногда после такой штамповки изделия подвергают термической обработке, травлению для снятия окалины, промывке, нейтрализации в щелочном растворе.

3.3.8.2. Новые направления обработки металлов давлением

Обработку давлением некоторых сталей и сплавов осуществляют в условиях сверхпластичности. Сверхпластичность — значительное увеличение пластичности и уменьшение сопротивления деформации при температуре фазовых превращений и вполне определенных скоростях деформации. В этих условиях проявляется в основном межкристаллитная деформация и отсутствует какое-либо значительное упрочнение металла. Некоторые виды обработки с использованием сверхпластичности.

Изотермическую штамповку (т. е. при постоянной температуре) используют для обработки сталей и сплавов с узким температурным интервалом обработки и не допускающих больших скоростей деформации. Штамп для такой штамповки изготовлен из жаропрочного сплава и установлен в индукционном нагревателе, обеспечивающим одинаковую и постоянную температуру заготовок и штамповых вставок. Изотермическая штамповка осуществляется на гидропрессах и улучшает структуру и свойства поковок.

Применение вибраций при волочении, горячей объемной и холодной листовой штамповке благодаря уменьшению контактного трения снижает усилия деформирования и приводит к повышению пластичности металла в процессе его обработки.

Для изготовления изделий из низкопластичных и труднодеформируемых металлов и сплавов применяют *гидростатическое выдавливание*, при котором жидкость высокого давления давит на заготовку, установленную в контейнер, с торца и боков. Для

горячего выдавливания подбирают жидкую среду, которая является одновременно и нагревателем для заготовки. При достижении требуемого давления металл заготовки выдавливается через матрицу с огромной скоростью, достигающей сотен метров в секунду.

Значительно повышается пластичность металла и при штамповке поковок выдавливанием на механических и гидравлических прессах с противодавлением со стороны торца выдавливаемого изделия, т. е. со стороны, противоположной давлению пуансона. Противодавление в штампе создается механической или гидравлической системой. Во время процесса выдавливания противодавление в штампе поддерживается постоянным.

Контрольные вопросы

1. Какие основные операции включает процесс отделки проката?
2. Для чего выполняют калибровку, какие виды калибровки существуют?
3. Каковы новые направления обработки металлов давлением?

3.4. Производство деталей из металлических порошков

3.4.1. Общие сведения

Для удовлетворения требований развивающейся техники необходимы материалы, обладающие очень высокой твердостью, износостойкостью, жаропрочностью и другими исключительными свойствами.

Создать такие материалы можно только на основе сплавов, так как у отдельных материалов сочетание таких свойств, как правило, не встречается. Например, химическое соединение вольфрама с углеродом — карбид вольфрама (WC) имеет высочайшую твердость, износостойкость и жаропрочность, но повышенную хрупкость. Хорошей вязкостью обладает кобальт (Co). Температура плавления карбида вольфрама 2870 °С, а кобальта 1400 °С. Обычными методами создать сплав WC—Co нельзя. Такие сплавы получают *методом порошковой металлургии*. Образующиеся сплавы называют *металлокерамическими*, подчеркивая, что технология их изготовления аналогична производству изделий из керамики. Так были получены твердые металлокера-

мические материалы для обработки металлов резанием, для бурения горных пород, которые произвели существенные изменения в этих областях.

Порошковая металлургия позволяет создать сплавы любого состава из металлических или смеси металлических и неметаллических порошков, которые практически взаимно не растворяются при плавлении или могут разлагаться при высоких температурах. Например, железо и свинец, алюминий и никель, медь и графит, металлы и оксиды, металлы и бориды и др. Методом порошковой металлургии можно получить сплавы с заранее заданными свойствами. Использование этого метода обеспечивает значительное снижение потерь металла.

Производство изделий из вольфрама и тантала, которые обладают высокой температурой плавления, можно осуществлять методами порошковой металлургии. Она позволяет изготовить некоторые конструкционные детали (кулачки, втулки и др.) без последующей механической обработки.

Изделия из металлокерамических сплавов нашли применение для металлорежущего инструмента, для волок и фильер при производстве проволоки, для подшипников скольжения и тормозных устройств, для металлических фильтров, для постоянных магнитов, электрощеток, электроконтактов, нагревателей электропечей и др.

К недостаткам порошковой металлургии следует отнести высокую стоимость металлических порошков, значительные расходы на изготовление пресс-форм и другой оснастки, низкие показатели вязкости и пластичности.

Контрольные вопросы

1. Что такое порошковая металлургия?
2. Как получают металлокерамические сплавы?

3.4.2. Способы производства металлических порошков

Существуют следующие основные способы получения металлических порошков: восстановление металлов из их оксидов или солей; электролитическое осаждение; распыление струи расплавленного металла; термическая диссоциация; механическое дробление.

Восстановление металлов из их оксидов или солей — наиболее распространенный способ. Оксиды или соли металлов получают при переработке рудных ископаемых. Восстановителями служат газы (водород, природный газ и др.) и твердые вещества (сажа, кокс, щелочные металлы и др.), для получения чистых металлических порошков используют водород. При восстановлении металлов газами или твердым веществом, содержащим углерод, одновременно с восстановлением происходит науглероживание, и порошок получается загрязненный карбидами. Для получения дешевого железного порошка технической чистоты с содержанием железа до 98,5 % используют следующий метод. В тигли последовательно слоями загружают измельченную железную руду и термоштыб (отходы при добыче каменного угля). Закрытые тигли поступают в туннельную печь, где поддерживается температура 1150...1200 °С.

При прохождении через печь происходит восстановление железа, которое затем очищается от остатков восстановителя, пустой породы и подвергается механическому дроблению.

Способом восстановления получают порошки из любых металлов, в том числе и тугоплавких (железо, вольфрам, тантал, молибден, ниобий, ванадий и др.).

Электролитическое осаждение. Этим способом можно получить порошки почти всех металлов. При электролизе из раствора на катоде получается осадок в виде плотного или рыхлого слоя, чешуек кристаллов. Качество осадка зависит от плотности тока, температуры и концентрации электролита. Осадок счищается с катода и измельчается в порошок механическим путем. Рыхлые осадки в процессе электролиза осыпаются с катода на дно ванны и последующего дробления не требуют. Получающиеся порошки характеризуются высокой чистотой и сравнительно большой стоимостью. В процессе электролиза порошок адсорбирует водород, в результате чего повышается хрупкость металла, для устранения которой производят отжиг порошка в нейтральной среде или вакууме.

Распыление струи расплавленного металла используют главным образом для легкоплавких металлов (олово, свинец, цинк, алюминий, медь), а также для получения порошков железа, никеля и других металлов с температурой плавления около 1500 °С. Этот способ достаточно производителен. Его недостаток — возможность окисления частиц порошка. Во избежание этого рекомендуется восстановительная или инертная среда.

При *термической диссоциации* используют летучие химические соединения — карбонилы, иодиды, галоиды и др. Для получения порошков железа применяют карбонилы, которые образуются при воздействии на железо оксида углерода при давлении 10...20 МПа и температуре около 200 °С:



Карбонил выводят из реакции и нагревают до температуры 350...500 °С при атмосферном давлении; в этих условиях соединение разлагается с образованием мелкодисперсного железного порошка. Затем порошок подвергают отжигу для удаления примесей. Этим способом получают порошки большой чистоты. Они имеют высокую стоимость, так как получены в результате больших материальных и энергетических затрат.

Механическое дробление. При этом способе используют шаровые, вибрационные и вихревые мельницы. Шаровая мельница представляет собой барабан, внутрь которого помещены шары из закаленной стали или твердых сплавов. Металл в виде мелких кусков, стружки засыпают в барабан, который приводится во вращение (30...120 об/мин), при этом происходит дробление материала за счет соударения шаров и ударов последних о барабан. В вибрационной мельнице барабану и шарам сообщаются колебания с амплитудой 2...3 мм при частоте, равной частоте вращения барабана (1500...3000 об/мин). Колебания осуществляются с помощью вибратора в виде эксцентрикового вала, соединенного с электродвигателем через упругую муфту. Вихревая мельница состоит из закрытого корпуса, внутри которого с большой скоростью вращаются в противоположных направлениях два пропеллера. Кусочки проволоки, подаваемые в рабочую камеру, увлекаются вихревыми потоками, которые создаются пропеллерами, и при ударе друг о друга измельчаются. Так как частички при этом нагреваются, в рабочей камере во избежание окисления должна быть инертная или восстановительная атмосфера. Вихревые мельницы можно использовать для измельчения любых металлов и сплавов. Ввиду невысокой производительности способа механического дробления получаемые порошки имеют более высокую стоимость по сравнению с изготовленными другими способами.

Наиболее дешевы порошки, изготовленные методом распыления расплавленного металла.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы получения металлических порошков?
2. В чем заключается сущность способа восстановления металлов из их оксидов или солей?
3. В чем заключается процесс получения порошков методом электролитического осаждения?
4. Каков принцип работы шаровых, вибрационных и вихревых мельниц?

3.4.3. Технологический процесс изготовления изделий из металлических порошков

В порошковой металлургии используют порошки, имеющие размеры частиц в пределах 0,1 мкм ... 0,5 мм. Гранулометрический состав определяют с помощью набора сит, имеющих различное число отверстий на единицу площади.

Порошки характеризуются не только размером частиц, но и их формой. Различают осколочную, плоскую, тарельчатую, дендритную и сферическую формы. Форма частиц определяется способом и условиями изготовления порошка. При методах восстановления и механическом дроблении получают частицы осколочной формы, при распылении и термической диссоциации — сферической и т. д. С формой и размерами частиц тесно связана *удельная поверхность* — отношение площади поверхности частиц к их массе. Удельная поверхность имеет особое значение для оценки взаимодействия различных порошков.

Для процесса изготовления изделий важное значение имеют такие свойства, как текучесть и прессуемость порошков. Текучесть определяется как количество порошка, протекающего в единицу времени через установленное отверстие. Этот показатель особенно важен для автоматизированного производства. Прессуемость определяется экспериментально и показывает способность порошка к уплотнению и сцеплению частиц.

Технологический процесс изготовления изделий из металлических порошков состоит из следующих операций: подготовка смеси для формования, формование заготовок или изделий, спекание заготовок или изделий.

Подготовка смеси для формования заключается в перемешивании порошков металлов, химических соединений и введение в

ряде случаев пластификаторов. Пластификаторы в виде растворов различных органических соединений (парафин, стеарин, каучук и др.) вводят для улучшения прессуемости порошков. Для растворов используют летучие растворители, которые удаляются из смеси при сушке. В результате операции подготовки исходные компоненты должны быть равномерно распределены по всему объему смеси. Смешивание происходит во вращающихся барабанах, в корпусных смесителях или смесителях типа «пьяной бочки».

Формование заготовки или изделий осуществляется путем холодного прессования в металлических формах, мундштучного или гидростатического прессования, холодной прокаткой или шликерным литьем.

Холодное прессование порошков в металлической форме осуществляется под большим давлением (30...1000 МПа) (рис. 3.16).

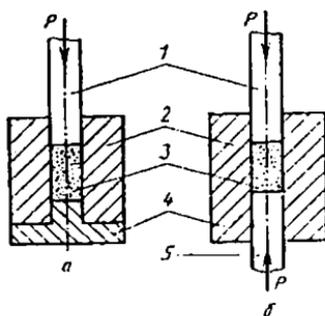


Рис. 3.16. Схема прессования в металлической форме: а — одностороннее; б — двустороннее: 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — порошок; 4 — вкладыш; 5 — второй вкладыш

Нижний предел давления используется для мягких металлов и сплавов. Плотность отпрессованного изделия зависит, главным образом, от давления, свойств металлического порошка и отношения высоты изделия к диаметру. Но даже при очень высоких давлениях за счет пористости не удается получить компактный металл. Одним из недостатков прессования в металлических формах является неравномерная плотность изделий по высоте и сечению, что объясняется влиянием сил трения зерен порошка о стенки пресс-форм. Для уменьшения неоднородности свойств используют двустороннее прессование, а для деталей сложной формы — прессование с несколькими пуансонами с

независимым перемещением. Прессованием получают изделия с массой не более 1,5 кг.

Мундштучное прессование или прессование выдавливанием применяют для получения изделий с большим отношением длины к диаметру (рис. 3.17).

При этом виде прессования в смесь добавляют пластификатор в количестве 10 %, получая пластичную массу. Она выдавливается через матрицу, которая может быть любой сложности. С применением иглы можно получить полые профили. Изделия, получаемые мундштучным прессованием, имеют равномерную плотность, их длина может достигать 300 мм.

Гидростатическое прессование используют для изготовления заготовок большой массы (рис. 3.18).

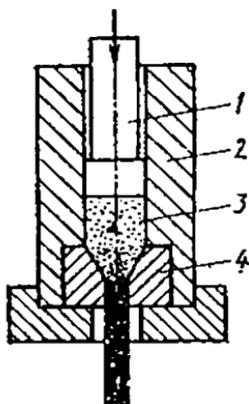


Рис. 3.17. Схема мундштучного прессования: 1 — пуансон; 2 — контейнер; 3 — порошок; 4 — матрица

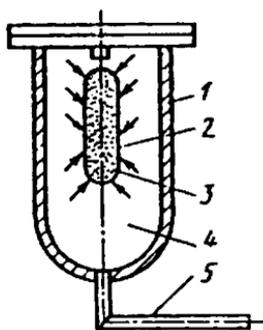


Рис. 3.18. Схема гидростатического прессования: 1 — цилиндр высокого давления; 2 — эластичная оболочка; 3 — порошок; 4 — жидкость; 5 — трубопровод к насосу высокого давления

Металлический порошок засыпают в герметичную эластичную (обычно резиновую) оболочку, где подвергают всестороннему сжатию жидкостью. Для получения заготовок с массой до 5 т и длиной 1 м резиновую оболочку помещают в перфорированную металлическую гильзу. При этом способе давление жидкости составляет 80...3000 МПа. При гидростатическом прессовании не требуются дорогостоящие пресс-формы, достигается равномерное и всестороннее сжатие порошка, что обеспечивает однородную плотность заготовок или изделий. Для достижения

точных размеров заготовки должны подвергаться дополнительной обработке.

Холодной прокаткой из порошков получают ленту, листы, различные профильные и многослойные материалы (рис. 3.19). Порошок 2 под действием силы тяжести из бункера 1 поступает в пространство между валками и обжимается ими, при этом объем порошка уменьшается в несколько раз. Обычно толщина прокатываемой ленты составляет 1 % диаметра вала. Прокатка порошков осуществляется при небольшой скорости вращения валков в пределах 0,5...50 об/мин. Валки обычно располагаются в горизонтальной плоскости; если валки расположить в вертикальной плоскости, то потребуется приспособление в виде желоба или шнека для подачи порошка. Прокаткой можно получать двух- и трехслойные ленты из различных материалов. Процесс прокатки поддается полной автоматизации и поэтому находит применение для переработки порошков радиоактивных материалов.

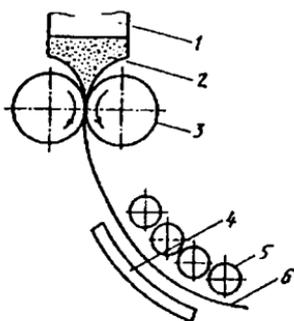


Рис. 3.19. Схема прокатки порошка: 1 — бункер; 2 — порошок; 3 — валки; 4 — направляющая; 5 — ролики; 6 — прокатанная лента

Шликерное литье используют для изготовления изделий небольших размеров сложной формы. Шликер представляет собой смесь металлического порошка с жидкостью (вода, расплавленный парафин и др.). Основная часть жидкости легко удаляется после литья в форму под давлением. Для полного удаления жидкости проводят нагрев изделия в вакууме.

Спекание — весьма ответственная операция технологического процесса. В результате спекания отформованные заготовки и изделия приобретают требуемые физико-механические свойства. При спекании происходят сложные физические и физико-химические процессы (раскristаллизация, диффузия, самодиффузия,

восстановление поверхностных оксидов и др.). Механическая связь между частицами, образовавшаяся в процессе формования, заменяется межзатомной, за счет чего изделие приобретает необходимую прочность. В процессе спекания происходит усадка, уменьшается пористость и возрастает плотность материала. Спекание изделий из однородных металлических порошков происходит при температуре, составляющей 70...90 % температуры плавления металла. Спекание изделий из смеси нескольких металлических порошков можно производить в твердой фазе или при наличии твердой и жидкой фаз. В первом случае температура спекания несколько ниже температуры наиболее легкоплавкого металла, во втором — выше температуры наиболее легкоплавкого металла, но ниже температуры плавления основного компонента.

Во избежание окисления спекание проводят в восстановительной атмосфере (водород, оксид углерода), в атмосфере нейтральных газов (гелий, аргон) или в вакууме. С повышением температуры и продолжительности спекания увеличивается усадка, плотность и улучшаются контакты между зёрнами. Для каждого металла или сплава характерна определенная, наиболее благоприятная температура, при которой происходит резкое увеличение плотности и прочности изделий, дальнейшее повышение температуры приводит к ухудшению их свойств.

Для получения необходимых размеров металлокерамические изделия подвергают калибровке, обработке резанием, химико-термической обработке (азотирование, хромирование, цианирование и др.), повторному прессованию.

Прессование и прокатку можно производить в горячем состоянии. При этом операции формования и спекания совмещают. Во избежание окисления эти операции следует выполнять в защитной атмосфере или в вакууме. Недостатками горячего прессования и прокатки являются их сложность и малая производительность.

Контрольные вопросы

1. Какими основными свойствами должны обладать порошки при изготовлении изделий?
2. Каков технологический процесс изготовления изделий из порошков?
3. Для получения каких изделий применяют мундштучное прессование?
4. Какова схема гидростатического прессования?

3.4.4. *Металлокерамические материалы*

К металлокерамическим материалам относятся твердые инструментальные сплавы, антифрикционные, фрикционные сплавы, пористые сплавы для фильтров и деталей охлаждения, сплавы для конструкционных деталей, магнитные сплавы, электротехнические сплавы, сплавы для работы в условиях высоких температур.

Антифрикционные металлокерамические сплавы изготавливают на железной, медной (бронзовой) или алюминиевой основе с добавлением небольшого количества графита в дисперсном состоянии. Графит снижает коэффициент трения, уменьшает износ, предохраняет детали от заедания. Сплавы характеризуются наличием пористости в пределах 10...30 %. Поры заполняются смазочными материалами (минеральное масло, сульфид молибдена и др.), что позволяет получать самосмазывающиеся подшипники, у которых самосмазывание при разогреве подшипника обеспечивается за счет выдавливания масла из пор. Подшипники могут работать в течение длительного времени без смазки при большой частоте вращения вала (до 3000 об/мин).

При спекании порошкового сплава на основе меди легкоплавкое олово диффундирует в медь, образуя твердый раствор. Антифрикционные металлокерамические сплавы обладают хорошей теплопроводностью, но пониженными показателями прочности. Поэтому целесообразно применение тонких антифрикционных покрытий, наносимых на поверхность стальных деталей. С этой точки зрения большой интерес представляет металлофторопластовый материал. В данном случае на стальную ленту с тонким медным покрытием наносят слой бронзового порошка, который после спекания образует пористый слой, прочно соединенный с подложкой, затем поры заполняются фторопластом. В дальнейшем из ленты вырезают заготовку, которую свертывают в подшипник. Такие подшипники могут работать в широком диапазоне температур, при больших давлениях, высокой частоте вращения и при отсутствии дополнительной смазки.

Фрикционные сплавы обладают высоким коэффициентом трения и одновременно износостойки. Их используют для дисков, лент, колодок в различных тормозных устройствах. Сплавы имеют сложный состав. Например, сплав на основе железа содержит,

помимо основного компонента, медь, свинец, графит, кремнезем, асбест, сернокислый барий. Асбест и кремнезем обеспечивают высокий коэффициент трения, медь — хорошую теплопроводность, свинец предохраняет от чрезмерного перегрева и способствует плавному торможению, сернокислый барий устраняет прилипаемость трущихся поверхностей. Прочность сплавов невелика, поэтому их используют в виде слоев толщиной 0,2...10 мм на стальной подложке.

Высокопористые сплавы нашли применение для изготовления фильтров. Металлические фильтры делают из порошков и сплавов, стойких против окисления (бронза, латунь, коррозионно стойкая сталь, нихром, никель, титан и др.). Пористость металлических фильтров составляет 40...60 % и выше. Прессование металлических фильтров, как правило, не производят, спеканию подвергается порошок, свободно засыпанный в форму. Для сохранения пор при спекании и для их увеличения в порошок вводят добавки, которые не сплавляются с основным материалом или улетучиваются под воздействием высоких температур.

Металлические фильтры применяют для очистки от твердых частиц жидкого горючего, смазочных материалов, газов и воздуха. Фильтры удобны в эксплуатации, имеют небольшие размеры. Для очистки их достаточно промыть, прокалить и продуть воздухом в направлении, обратном фильтрации.

Порошковые сплавы с большой пористостью используют для деталей, требующих интенсивного охлаждения. При пропускании жидкости через поры происходит ее испарение, при этом отбирается большое количество теплоты и осуществляется охлаждение детали. Этот метод в 8...10 раз эффективнее принятых способов охлаждения. Пористые детали нашли применение для охлаждения в газовых турбинах, реактивных двигателях.

При серийном изготовлении (50...100 тыс. шт.) слабо нагруженных деталей машиностроения (втулки, кулачки, крышки, фланцы, рычаги и т. д.) целесообразно применение порошковой металлургии. После прессования детали не подвергают дополнительной обработке.

Магнитные металлические материалы на основе Al, Ni, Co, Cu, изготавливаемые методом порошковой металлургии, имеют прочность в три раза выше, чем литые сплавы. Это достигается за счет мелкозернистой структуры металлокерамических материалов.

Высококачественными магнитными материалами являются чистый железный порошок, получаемый электролитическим способом, железный порошок высокой чистоты, изготавливаемый способом термической диссоциации (распадение молекул на несколько более простых частиц-молекул, атомов, радикалов или ионов) карбонильного железа.

Металлокерамические сплавы хорошо зарекомендовали себя для деталей электротехнического назначения типа щеток электрических машин и различных контактов. Щетки электрических машин должны обладать высокой электропроводностью и износостойкостью. Медь имеет хорошую электропроводность, но плохо сопротивляется истиранию. Введение в порошковую медь мелкодисперсного порошка графита позволило создать высококачественные щетки. Материалы для электрических контактов должны обладать хорошей электропроводностью, теплопроводностью, твердостью и износостойкостью при высоких температурах. Эти свойства удается получить в сплаве на основе вольфрама и меди, молибдена и серебра.

Для работы в условиях высоких температур созданы металлокерамические сплавы на основе различных тугоплавких химических соединений металлов — карбиды титана, ниобия и тантала, борид титана, оксид алюминия и др. Материалы характеризуются высокими жаропрочностью и жаростойкостью. К недостаткам сплавов следует отнести большую хрупкость, высокую чувствительность к надрезам.

Детали из таких сплавов успешно работают при высоких температурах без приложения динамических нагрузок или при одноразовом применении при резком нагреве и охлаждении.

Порошковая металлургия позволила создать *магнитные материалы* — *ферриты*, состав которых выражается формулой $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me — символ двухвалентного металла. Большое электрическое сопротивление, достигаемое за счет введения оксидов металла и превышающее сопротивление железа в миллионы и миллиарды раз, а следовательно, и малые потери энергии при высоких частотах электрического тока, наряду с хорошими магнитными свойствами, обеспечили ферритам широкое применение в электронной технике. Ферриты используются для сердечников различных трансформаторов, запоминающих устройств счетно-вычислительной техники, постоянных магнитов и др. Изделия из ферритов технологичны при

изготовлении, характеризуются небольшими размерами и массой, малой стоимостью. Недостаток — низкая механическая прочность.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы относятся к металлокерамическим?
2. Где находят применение высокопористые материалы?
3. Каковы свойства магнитных металлических материалов?

3.5. Пластические массы, технология изготовления изделий из пластмасс

3.5.1. Основные сведения. Структура пластмасс

Пластические массы находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. В качестве конструкционных материалов пластмассы используют в машиностроении, автомобильной промышленности, авиации, приборостроении, электромашиностроении, судостроении и др. Широко известно использование материалов в качестве пленок, клеев, волокон.

Пластические массы — это материалы на основе полимеров.

Полимер — высокомолекулярное соединение, макромолекулы которого состоят из очень большого числа простых, одинаковых, повторяющихся звеньев. Например, полиэтилен $[-CH_2-CH_2-]_n$ образуется из мономера этилена $CH_2=CH_2$, где число n может достигать нескольких десятков тысяч единиц.

Если макромолекула состоит из звеньев различной природы, то материал называется сополимером. Введение в полимер звеньев другой природы вызвано стремлением получить материал с требуемыми свойствами.

Макромолекулы полимеров могут иметь линейную, разветвленную или сетчатую (сшитую) структуру (рис. 3.20).

Внутри макромолекулы между атомами во всех трех случаях действуют прочные ковалентные связи, энергия которых 300...500 кДж/моль. У полимеров с линейной и разветвленной структурой между макромолекулами чаще всего действуют силы притяжения отрицательных и положительных частиц, энергия

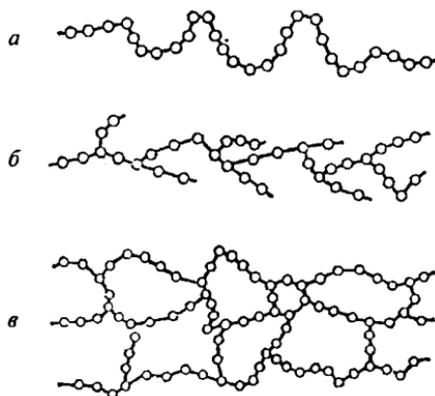


Рис. 3.20. Структура молекул: а — линейная; б — разветвленная; в — сетчатая (сшитая)

которых до 10 кДж/моль, т. е. в десятки раз меньше. У полимеров с сетчатой структурой между макромолекулами действуют главным образом прочные ковалентные связи.

Полимеры с линейной и разветвленной структурой относятся к термопластичным (термопластам), а с сетчатой структурой — к термореактивным (реактопластам).

Термопласты (полиэтилен, полистирол, капрон и др.) при нагреве расплавляются до высоковязкой жидкости, при охлаждении они восстанавливают свои свойства. Это объясняется тем, что при нагреве разрушаются слабые межмолекулярные связи, а ковалентные связи сохраняются, что позволяет перерабатывать термопласты неоднократно. Термопласты обладают повышенной пластичностью, но малой теплостойкостью, они растворимы в соответствующих растворителях.

Реактопласты (стеклопластики, текстолит и др.) при повышении температуры не размягчаются, но при достижении достаточно высокой температуры разрушаются. Они не растворимы и могут только набухать в растворителях.

В зависимости от строения звена макромолекулы различают *неполярные* (в случае симметричного строения звена макромолекулы полимер — неполярный) и *полярные* (при несимметричном строении — полярный). При симметричном строении центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают, и молекула становится электрически нейтральной. При несимметричном строении в результате несовпадения центров тяжести положительных и отрицательных зарядов молекула обладает оп-

ределенным дипольным моментом. Неполярные полимеры, например, фторопласт-4, не поглощают влагу и характеризуются стабильными свойствами. Полярные материалы, например, поливинилхлорид, поглощают влагу, изменяют свои размеры и свойства во времени.

Полимеры в зависимости от своей природы и условий затвердевания могут иметь структуру с преобладающим содержанием аморфной (молекулы в основном расположены хаотически) или кристаллической (макромолекулы расположены в основном упорядоченно) фазы.

При переработке, эксплуатации и хранении полимер подвергают воздействию теплоты, света, кислорода, влаги, химических соединений, механических нагрузок, электрических полей и др., под воздействием которых изменяются его свойства.

Необратимое изменение свойств полимера во времени под влиянием внешней среды называется *старением*. При старении могут произойти разрыв основной молекулярной цепи и распад полимера на низкомолекулярные соединения. Это явление называется *деструкцией*. Причиной деструкции являются поступление избыточной энергии за счет теплоты, света, механических нагрузок и др., а также химические изменения под действием кислорода или других окислителей.

Для борьбы со старением в полимеры вводят *стабилизаторы*, которые, вступая в реакцию, препятствуют развитию процессов окисления. Например, введение в полиэтилен 2 % сажи повышает устойчивость его против старения в 30 раз. Механические свойства термопластов резко зависят от температуры среды и времени приложения нагрузки. У реактопластов — в меньшей степени. Температура среды и время приложения нагрузки сильно влияют на механические свойства термопластов и значительно меньше ухудшают механические свойства реактопластов, так как они обладают сетчатой структурой макромолекул.

Контрольные вопросы

1. Что такое пластические массы?
2. Какую структуру могут иметь макромолекулы полимеров?
3. Что такое термопласты и реактопласты?
4. Какова роль стабилизаторов в борьбе со старением?

3.5.2. Физическое состояние полимеров

Полимеры при обычной температуре могут находиться в одном из трех физических состояний:

- *стеклообразном* — полимерный материал сопротивляется воздействию температуры, и деформация его является в основном упругой, т. е. после снятия нагрузки она очень быстро исчезает (например, полистирол);
- *высокоэластическом* — наблюдается значительная деформация, которая после снятия нагрузки исчезает за некоторое время (например, каучук);
- *вязкотекучем* — наблюдается остаточная деформация, при этом происходит перемещение макромолекул относительно друг друга (например, полиизобутилен).

В машиностроении полимеры используются, как правило, в стеклообразном и высокоэластическом состоянии. Переработка полимеров в изделия осуществляется в вязкотекучем и, реже, в высокоэластическом состояниях.

Всякий *релаксационный процесс* заключается в стремлении системы к восстановлению нарушенного равновесия в результате теплового движения молекул.

Для низкомолекулярных веществ, например, металлов, релаксационные процессы в пределах жаропрочности протекают мгновенно, за миллионные доли секунды. Для полимерных материалов релаксационные процессы растянуты во времени, что связано с наличием длинных и запутанных макромолекул, которые не успевают отреагировать на снятие или на приложение нагрузки. Эта специфика протекания релаксационных процессов влияет на поведение полимеров под нагрузкой, что имеет важное практическое значение в инженерной практике.

Если приложить к образцу полимера достаточно большую нагрузку, то в нем с течением времени будет развиваться деформация, которая в общем случае складывается из упругой, высокоэластической и остаточной деформации. С повышением температуры среды *ползучесть* усиливается, так как облегчаются условия распрямления макромолекул, при снижении уровня нагрузки ползучесть уменьшается. В инженерной практике не следует допускать чрезмерной ползучести деталей.

Упругое последствие вызывает изменение линейных размеров деталей из полимеров после изготовления их методом литья под давлением.

Если прекратить деформирование растянутого на разрывной машине образца полимера и следить за стрелкой силоизмерителя, то можно увидеть, как со временем стрелка вернется к делению «ноль». Значит, напряжение в образце исчезло. Произошла релаксация напряжения. На практике релаксация напряжения проявляется, например, в виде ослабления пружин.

Механический гистерезис имеет место, например, при многократном растяжении образца или детали. При этом кривая разгрузки не совпадает с кривой нагрузки. Это явление используется в устройствах для гашения вибрации.

Контрольные вопросы

1. В каких физических состояниях могут находиться полимеры при обычной температуре?
2. Что такое ползучесть и упругое последствие?

3.5.3. Основные представители полимеров и пластмасс и их применение в народном хозяйстве

При введении в полимер наполнителей, пластификаторов, пигментов, стабилизаторов получают пластмассы — композиционные материалы, состоящие из нескольких компонентов.

Наполнители (древесная или кварцевая мука, стекловолокно, стеклоткань, хлопчатобумажная ткань, бумага и др.) вводят для изменения свойств полимеров, их удешевления; пластификаторы (дибутилфталат и др.) — для повышения пластичности материала; пигменты (оксид железа, оксид хрома и др.) — для достижения необходимой окраски; стабилизаторы (сажу и др.) — для борьбы со старением.

Основными термопластичными полимерами (термопластами) являются:

- *полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и низкого давления (ПЭНД).* Они являются неполярными материалами кристаллической структуры. ПЭВД получается при высоком давлении и имеет повышенную эластичность, относительное удлинение при разрыве. ПЭНД получается при низком давлении и обладает повышенной прочностью, предел прочности при растяжении 22...32 МПа (σ_p). Полиэтилен характеризуется низким водопоглощением за 24 часа (0,01...0,03 %), вы-

сокими диэлектрическими свойствами, которые не изменяются при больших частотах электрического тока, и хорошей химической стойкостью. Недостатки полиэтилена — невысокая механическая прочность, низкая теплостойкость и склонность к старению. Применение: ПЭВД используют для изоляции проводов, кабелей, для изготовления пленки; ПЭНД — для труб, различных емкостей, конструкционных несилловых деталей машиностроения и радиотехники;

- *полипропилен* характеризуется повышенной прочностью и теплостойкостью. Недостаток — пониженная морозостойкость ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$). По диэлектрическим и химическим свойствам близок к полиэтилену. Его используют для электрической изоляции, изготовления труб, различных конструкций деталей;
- *полистирол* — стеклообразный при нормальной температуре материал, более жесткий, чем полиэтилен. Обладает хорошими диэлектрическими свойствами. Недостаток — хрупкость, пониженная теплостойкость;
- *пенополистирол* получают при введении в полистирол порошков и последующем вспенивании. Хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства, малая плотность, химическая стойкость и водостойкость. Используется как электроизоляционный материал, в электротехнике в виде деталей и виде пленки. Сополимер стирола с метилметакрилатом применяют для сигнальных фонарей автомобилей;
- *поливинилхлорид (ПВХ)* — является полярным, практически аморфным полимером, обладающим низкой температурой разложения. Для предохранения материала от разложения в него вводят стабилизатор, а для повышения пластичности — пластификатор. Стабилизированный ПВХ называют винипластом (используют в качестве труб, листов, емкостей в химической, нефтяной, пищевой промышленности), а стабилизированный и пластифицированный — пластикатом (на его основе изготавливают линолеум, искусственную кожу и др.);
- *органическое стекло* характеризуется хорошей светопрозрачностью. Применяют для остекления транспортных средств, изготавливают низкочастотные изоляторы. Недостаток — поверхностное растрескивание. Для повышения механической прочности и сопротивляемости растрескиванию проводят вытяжку листов оргстекла в высокоэластическом состоянии;

- *капрон* относится к полиамидам. Обладает повышенными механическими свойствами по сравнению с ранее названными и имеет хорошие антифрикционные свойства. Недостаток — большое влагопоглощение. Его используют в машиностроении (подшипники скольжения, шестерни и др.);
- *фторопласт-4* обладает высокой химической стойкостью ко всем кислотам и щелочам, совершенно не поглощает воду. Является самым лучшим диэлектриком на любых частотах электрического тока. Недостаток — невысокие механические свойства, интенсивная ползучесть при небольших нагрузках. Используется как электроизоляционный, антифрикционный материал, а также для несилевых деталей, работающих в агрессивных жидкостях. Изделия из фторопласта-4 изготавливают механической обработкой из заготовок. Заготовки прессуют из порошка при высокой температуре с последующим спеканием при повышенной температуре в печах с отсосом воздуха. Использование фторопластовой пленки позволяет создать направляющие металлорежущих станков с минимальным коэффициентом трения, что особенно важно для станков с ЧПУ. Эффективно использование фторопластовой пленки для кабелей высокого напряжения.

К *терморактивным полимерам (реактопластам)* следует отнести *фенолформальдегидную, полиэфирную, эпоксидную, кремнийорганическую смолы*, которые в отвержденном состоянии имеют сетчатую структуру макромолекул. Они имеют невысокую механическую прочность и в чистом виде в машиностроении не используются. Смолы широко применяют в качестве «связующего» для изготовления пресс-порошков, стекловолоконитов, стекло-текстолитов, текстолитов, углепластиков и др.

Основными реактопластами являются:

- *пресс-порошки* представляют собой композиционные материалы чаще всего на основе фенолформальдегидной смолы и наполнителя в виде древесной, кварцевой муки, асбеста, графита и др. Из него изготавливают: розетки, патроны, штепсели, несилевые детали машиностроения (кнопки, ручки, маховики и т. д.). Наполнитель придает материалу необходимые свойства, снижает усадку и стоимость;
- *стекловолокониты* получают с использованием смол и неориентированных стеклянных волокон (АГ-4В), а также с наполнителем в виде стеклянной ленты (АГ-4С), которая

обеспечивает материалу повышенные механические свойства. Стекловолокниты — это прочный конструкционный материал. Они обладают хорошими электроизоляционными свойствами;

- *стеклотекстолиты* изготавливают с использованием наполнителей в виде стеклотканей. Характеризуются высокими механическими, электроизоляционными свойствами. Плохо обрабатываются механическим способом. Применение — для изготовления печатных плат;
- *текстолиты* получают на основе фенолформальдегидной смолы и хлопчатобумажной ткани. Имеют хорошие антифрикционные свойства, высокую прочность на сжатие и хорошие электроизоляционные свойства. Их используют для подшипников скольжения, зубчатых колес (в ткацких, конторских машинах, приборостроении) и деталей электроизоляционного назначения. Обрабатываемость текстолита механическими способами удовлетворительная;
- *углепластики* получают с использованием углеродных волокон. Углеродные волокна изготавливают из вискозного или полиакрилонитрильного волокна путем их термической обработки при 1500...3000 °С в инертной среде. Для углепластиков характерна повышенная жесткость и высокая тепло- и химическая стойкость. Их применяют для изготовления сопел реактивных двигателей.

Контрольные вопросы

1. Для чего используются пластификаторы, наполнители, пигменты и стабилизаторы?
2. Какие пластмассы относятся к термопластам и каковы их основные свойства?
3. Какие материалы относятся к реактопластам? Перечислите их свойства и применение.

3.5.4. Технология изготовления изделий из пластмасс

3.5.4.1. Технологические особенности переработки пластмасс

При переработке в изделия пластмассы подвергают воздействию теплоты, механического давления, кислорода воздуха и света. Чем выше температура, тем материал пластичнее и тем легче

проходит процесс переработки. Однако под влиянием высоких температур и названных выше факторов в пластмассах происходят разрыв химических связей, окисление, образование новых нежелательных структур, перемещение отдельных участков макромолекул и макромолекул относительно друг друга, ориентация макромолекул в различных направлениях. Основная задача при переработке заключается в замедлении отрицательных процессов и создании необходимой структуры материала. Самые простые приемы для достижения этой цели — регулирование температуры, давления, скорости нагрева и охлаждения материала. Кроме того, используют стабилизаторы, увеличивающие стойкость материала против старения, пластификаторы, понижающие вязкость и повышающие гибкость молекулярных цепей, а также различные наполнители.

Особенность переработки реактопластов в изделия состоит в сочетании процессов формирования с отверждением, т. е. с химическими реакциями образования сшитой структуры макромолекул. Неполное отверждение ухудшает свойства материала. Достижение необходимой полноты отверждения даже в присутствии катализаторов и при повышенных температурах требует значительного времени, что увеличивает трудоемкость изготовления детали. Окончательно отверждение материала может происходить вне формующей оснастки, так как изделие приобретает устойчивую форму до завершения этого процесса.

При переработке композиционных материалов большое значение имеет адгезия (сцепление) связующего с наполнителем. Величина адгезии может быть повышена путем очистки поверхности наполнителя и сообщения ей химической активности.

При процессах переработки термопластов происходит ориентация макромолекул, причем прочность материала в направлении ориентации возрастает, а в поперечном направлении — уменьшается. При получении пленок и тонкостенных изделий это явление играет положительную роль, во всех остальных случаях оно вызывает структурную неоднородность и служит причиной возникновения остаточных напряжений. Различие по сечению изделия в скоростях охлаждения, в степени кристаллизации, полноте протекания релаксационных процессов для термопластов и степени отверждения для реактопластов приводит также к структурной неоднородности и появлению дополнительных остаточных напряжений в изделиях. Для снижения остаточных на-

пряжений применяют термическую обработку изделий, формирование структуры при переработке и другие технологические приемы.

3.5.4.2. Переработка термопластов в изделия

Для изготовления изделий из термопластов наиболее часто используют следующие основные способы: литье под давлением; центробежное литье; свободное литье; экструзию (выдавливание); раздувку; вакуумное и пневматическое формование; штамповку.

Литье под давлением — наиболее распространенный и высокопроизводительный метод получения конструкционных деталей из термопластов. Оно осуществляется на литьевых машинах и заключается в размягчении материала в цилиндре за счет нагрева и перемешивания его шнеком до вязкотекучего состояния. При поступательном движении шнека материал через сопло под давлением впрыскивается в литьевую форму, где охлаждается и остывает, повторяя конфигурацию формы. Весь процесс — от подачи гранул материала до транспортировки готового изделия — может быть автоматизирован. Наряду со шнековыми для переработки термопластов применяют поршневые литьевые машины, перемешивание материала в которых осуществляется в меньшей степени. Режимы переработки термопластов подбирают в зависимости от вида материала и конструкции изделия.

Переход материала в зону высокой текучести наступает при сравнительно высокой температуре, когда возможно появление брака. Поэтому термопласты формуют в условиях ограниченной текучести, а недостаток ее компенсируют большим давлением.

Преимущества литья под давлением: малая трудоемкость, высокая точность с хорошей чистотой поверхности, возможность автоматизации процесса.

К недостаткам процесса можно отнести появление в деталях остаточных напряжений и расход материала на литники, необходимые для подвода материала в форму.

Центробежное литье заключается в том, что расплав термопласта заливают в нагретую цилиндрическую форму, которую приводят во вращение. Центробежная сила отбрасывает материал к стенкам формы и уплотняет его. После охлаждения и остановки формы изделие извлекают и подвергают механической обработке. Так изготавливают толстостенные трубы, втулки, шестер-

ни и заготовки. Этот способ применяют, когда изделие не может быть изготовлено другим способом.

Свободное литье заключается в том, что разогретый материал отверждается в форме без давления. Способ прост, но использование его ограничено из-за появления в изделии раковин и других дефектов. Для устранения дефектов процесс производят на вибростоле с использованием вакуума, что позволяет уплотнить материал и удалить газы, выделяющиеся при полимеризации. Этот метод применяют для получения изделий и заготовок из органического стекла, а также капролита массой до нескольких десятков килограммов. Методы центробежного и свободного литья используют иногда для изготовления изделий из эпоксидных и полиэфирных смол холодного отверждения с наполнителями.

Метод экструзии заключается в размягчении материала и непрерывном выдавливании его червячными или дисковыми устройствами в вязкотекучем состоянии через профилирующее отверстие головки с последующим охлаждением изделия. Так получают трубы, стержни, листы, пленки, изделия, имеющие поперечное сечение в виде различных профилей.

Поступающий в бункер 2 (рис. 3.21) материал расплавляется и перемешивается червяком 4, что обеспечивает однородность расплава. Метод экструзии, наряду с методом литья под давлением, является одним из самых распространенных при переработке термопластов. Большое преимущество его — высокая производительность, равная 1 м/мин готового изделия.

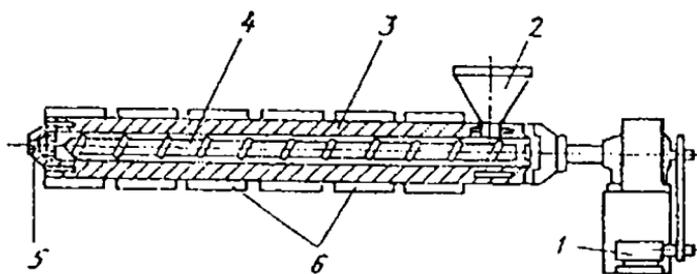


Рис. 3.21. Горизонтальный экструдер: 1 — привод; 2 — бункер; 3 — цилиндр; 4 — червяк; 5 — канал для выхода расплава; 6 — нагреватели

Метод раздувки используют для изготовления пустотелых изделий (канистры, бутылки) и пленок. При этом методе термопласт выдавливается через головку экструдера в виде трубчатой заготовки. К заготовке подводят полуформы (рис. 3.22), затем их

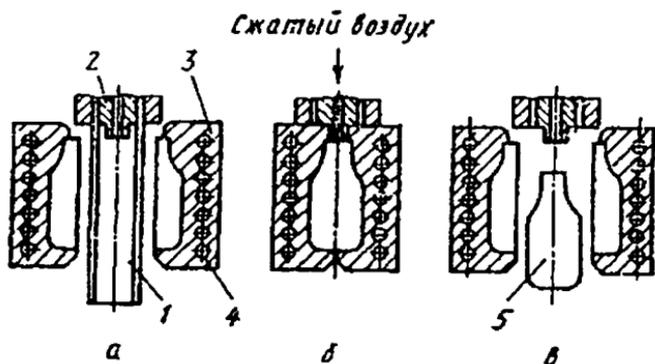


Рис. 3.22. Схема раздувки полых изделий: а — форма разомкнута и подана заготовка; б — форма сомкнута и подан сжатый воздух; в — форма разомкнута; 1 — трубчатая заготовка; 2 — головка экструдера; 3 — форма; 4 — каналы для охлаждения формы; 5 — изделие

смыкают. Через горловину изделия подводят сжатый воздух, который раздувает заготовку до необходимой конфигурации. За 1 час изготавливают 600 бутылей вместимостью 500 см³.

Метод раздувки (рис. 3.23) является основным для получения пленок из полиэтилена, полипропилена и других материалов, которые не подвергаются термической деструкции при переходе в вязкотекучее состояние.

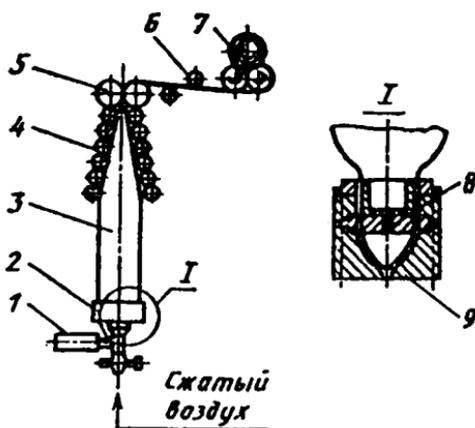


Рис. 3.23. Схема получения пленки методом раздувки: 1 — экструдер; 2 — формирующая головка; 3 — рукав пленки; 4, 6 — направляющие ролики; 5 — тянущие ролики; 7 — барабан с пленкой; 8 — канал для подачи сжатого воздуха; 9 — канал для подачи расплавленного полимера

При этом способе расплав полимера экструдирован в виде рукава, который затем растягивается сжатым воздухом. Это наиболее экономичный и производительный процесс изготовления пленок. Диаметр рукава пленки может достигать при этом способе 16 м.

Кроме способа раздувки для изготовления пленок используют способ полива раствора полимера (целлюлоза, полиамиды, поликарбонат и др.) на полированную поверхность, каландрования — прокатку пластифицированного полимера (поливинилхлорид) через систему валиков с изменяющимся зазором между ними и снятие с заготовки широким резцом стружки с последующей калибровкой. Последний способ используют для получения пленки из фторопласта-4, способного разлагаться с выделением фтора при нагреве до момента перехода материала в вязкотекучее состояние.

Метод вакуумного и пневматического формования. Этим методом перерабатывают листовые термопласты (органическое стекло, полистирол и др.) При вакуумном способе формование осуществляют под воздействием силы, возникающей из-за разности между атмосферным давлением воздуха и разряжением внутри формы. Эта сила воздействует на нагретый до высокоэластического состояния лист термопласта, производя формование. Для фиксации полученной формы изделие охлаждают. Метод вакуумного формования используют для изготовления изделий из пленок и тонких листов. Для переработки толстых листов вакуумное формование дополняют механическим и пневматическим. При пневматическом формовании нагретый лист термопласта устанавливают на форме и подвергают воздействию избыточного давления воздухом. Такими методами изготавливают крупногабаритные детали для холодильников, различные ванны и др.

Метод штамповки используют для изготовления тонкостенных и крупногабаритных изделий. Формование осуществляется в результате вытяжки, изгиба или сжатия заготовок пуансоном. Заготовки обычно нагревают до высокоэластического состояния. В том случае когда материал способен к большим вынужденным высокоэластическим деформациям под влиянием большого давления, заготовки не нагревают. Разновидностью штамповки является вырубка с помощью штампов, оснащенных режущими инструментами. Изготавливают вырубкой: прокладки, монтажные колодки, заготовки для печатных плат из фольгированного материала.

3.5.4.3. Переработка реактопластов в изделия

Пресс-порошки, волокниты, стекловолокниты перерабатывают в изделия методом прессования, заключающимся в пластической деформации материала при одновременном воздействии на него теплоты и давления с последующей фиксацией формы изделия. При прессовании материал превращается в расплав, уплотняется, заполняет формующую полость пресс-формы и отверждается. В процессе уплотнения происходит сближение частиц до такого состояния, что между ними возникают силы межмолекулярного взаимодействия, в результате чего образуется компактное тело, которое затем подвергается объемному сжатию.

Основными параметрами технологического процесса являются температура прессования, давление, время выдержки деталей под давлением в пресс-форме. Различают прямое (компрессионное), литьевое и штранг-прессование.

Прямое прессование осуществляют в открытых, закрытых и полужакрытых пресс-формах (рис. 3.24).

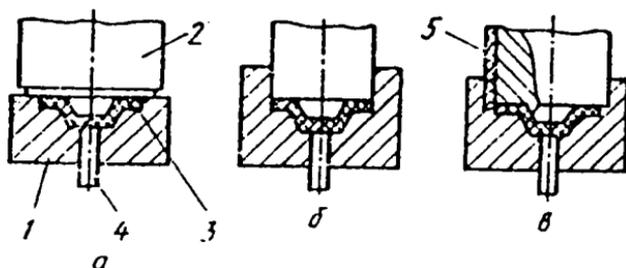


Рис. 3.24. Схема пресс-форм прямого прессования: а — открытая пресс-форма; б — закрытая; в — полужакрытая: 1 — матрица; 2 — пуансон; 3 — изделие; 4 — избыточный материал; 5 — зазор между пуансоном и матрицей

Открытые пресс-формы просты, имеют небольшую массу и стоимость. Их используют для изделий несложной формы из реактопластов, для формования резиновых изделий, а также некоторых деталей из слоистых пластмасс. Полученные изделия имеют невысокую точность размеров по высоте.

Пресс-формы закрытого типа имеют загрузочную камеру, и вытекание материала из оформляющей полости практически исключено. Пресс-формы требуют точной подгонки пуансона и матрицы. Они дороги и быстро изнашиваются. Их используют для изготовления глубоких тонкостенных изделий из трудноформируемых волокнистых или слоистых материалов.

Пресс-формы полузакрытого типа имеют большую площадь загрузочной камеры, чем площадь горизонтальной проекции формируемого изделия, что препятствует вытеканию материала из незамкнутой пресс-формы. Между пуансоном и матрицей этой пресс-формы имеется гарантированный зазор для вытекания избытка материала. Эти пресс-формы нашли наибольшее распространение.

Литьевое прессование применяется для деталей сложной конфигурации с металлической арматурой и небольшой толщиной стенок. При этом методе материал пластифицируется в загрузочной камере и по литниковому каналу поступает в оформляющую часть пресс-формы (рис. 3.25).

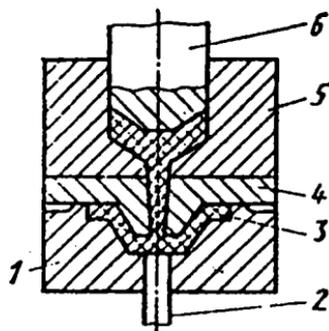


Рис. 3.25. Схема пресс-формы литьевого прессования: 1 — матрица; 2 — выталкиватель; 3 — изделие; 4 — пуансон; 5 — загрузочная камера; 6 — пуансон загрузочной камеры

Материал в пластичном состоянии не сдвигает металлическую арматуру и легко проникает в узкие полости пресс-формы.

Недостатком этого способа является высокая стоимость пресс-форм и повышенный расход материала. Для повышения производительности метода прессования порошкообразных и волокнистых пластмасс используют многогнездные пресс-формы, роторные автоматические линии и другие специализированные автоматические установки.

Штранг-прессование применяют для изготовления профильных изделий из пресс-порошков и асбоволокнита. Этот метод заключается в выдавливании материала через пресс-форму с открытым входным и выходным отверстиями или через специальную головку. Метод занимает промежуточное положение между прессованием и экструзией. Штранг-прессование осуществляет-

ся на горизонтальных прессах, поршень которых медленно совершает рабочий ход и быстро возвращается в исходное состояние. Этот метод используют также при переработке фторопластов и для изготовления массивных стержней и толстостенных труб из жесткого поливинилхлорида.

Листовые материалы — текстолит, асботекстолит, стекло-текстолит, гетинакс, древесно-слоистые пластики получают прессованием на многоэтажных прессах.

Для переработки стеклопластиков в изделия используют следующие методы:

- *контактный.* При этом методе используют стеклоткани и полиэфирную или эпоксидную смолы, которые способны отверждаться при нормальной температуре без давления за счет введения специальных веществ (полиэтилен — полиамин для эпоксидной, нафтената кобальта и гидроперекиси кумола для полиэфирной смолы). Контактный способ прост, не требует высококвалифицированного труда, но является трудоемким. Метод используется для изготовления крупногабаритных изделий сложной конфигурации при мелкосерийном производстве. Так изготавливают кузова спортивных автомобилей, лопасти вентиляторов, мелкие суда, шлюпки, лодки, катера;
- *формование с резиновым чехлом* — при этом способе модель с уложенной на нее пропитанной смолой и подсушенной стеклотканью покрывают тонкой металлической оболочкой и резиновым чехлом, который герметически прижимается к модели. Из полости между чехлом и пакетом стеклоткани откачивают воздух. За счет разницы между атмосферным давлением и разрежением осуществляется формование. Нагрев изделия в этом случае производится либо электронагревателями, установленными в стенках формы, или в термоскафу;
- *при прессовании с упругим пуансоном или матрицей* давление распределяется более равномерно, чем при металлическом пуансоне. При этом методе пакет приготовленной стеклоткани укладывают в матрице или на пуансон, нагревают и под давлением прессуют. При формовании изделий с резиновым чехлом, резиновым пуансоном или матрицей снижается трудоемкость изготовления и повышается качество изделий по сравнению с контактными способами;

- *пресс-камерный способ* переработки стеклопластиков можно рассмотреть на примере изготовления крупногабаритной лопатки осевого вентилятора. Пресс-форма для такой лопатки состоит из двух половин, которые устанавливают на пресс, обеспечивающий необходимые давление и температуру. В нижнюю часть пресс-формы укладывают пакет стеклоткани, предварительно пропитанной смолой и подсушенной для удобства работы. На стеклопакет насыпают гранулированный пенопласт, сверху которого укладывают еще один пакет стеклоткани. Опускают вторую половину пресс-формы. Имеющиеся в пресс-форме режущие кромки перерезают излишки стеклоткани по периметру изделия. Под влиянием теплоты пенопласт вспенивается, объем его увеличивается в несколько раз, развивается избыточное давление, которое и формирует оболочки лопатки. Изделия получаются с большой точностью, с хорошей чистотой поверхности и с внутренним пенопластовым сердечником;
- различают *схемы намотки стеклопластиковых изделий* — «мокрую» и «сухую» намотку. При мокрой намотке стекложгут, сматываясь с бобины, пропитывается связующим в ванне и наматывается на оправку. При сухой намотке стеклонаполнитель пропитывается смолой под давлением после намотки. Существуют различные схемы намотки наполнителя, например, спиральная и продольно-поперечная. Спиральная намотка осуществляется при вращении оправки и возвратно-поступательном движении каретки. При продольно-поперечной намотке стекложгут с помощью специальных устройств укладывается на оправку образующей цилиндра и по кольцу. Эта намотка обеспечивает максимальную прочность изделия. Так изготавливают трубы, цистерны, баки, сопловые раструбы и корпуса двигателей для ракет и др.;
- *методом протяжки* изготавливают профильные изделия (трубки, стержни, уголки и т. д.). Стекложгут или стеклонити сматывают с бобин, пропитывают связующим в ванне, собирают в пучок и протягивают через формирующую головку. Здесь изделию придается форма и осуществляется частичное отверждение. Для более полного отверждения изделие помещают в термокамеру;
- *метод прокатки* используют для изготовления плоских и гофрированных листов из стеклопластиков. Стекломат или

стеклоткань пропитывают смолой в ванне, затем отжимными валками удаляют избыток смолы. Пропитанные листы покрывают целлофаном, спрессовывают и отверждают при пропускании через обогреваемые валки;

- *компрессионное прессование* применяют для изготовления определенных изделий из стеклопластика. При этом применяют ранее описанные открытые пресс-формы.

3.5.4.4. Методы соединения пластмасс

Одним из основных методов неразъемного соединения пластмасс является *сварка*. Ее выполняют путем перевода соединяемых деталей в вязкотекучее состояние, при котором макромолекулы обладают повышенной подвижностью, и последующего сдавливания места соединения определенным усилием. При этом происходит взаимная диффузия макромолекул или их частей, за счет чего после охлаждения осуществляется соединение деталей. Прочность соединения определяется силами межатомного и межмолекулярного взаимодействия. При сварке достигаются одинаковый состав и свойства в месте соединения, герметичность шва. Процесс сварки может быть механизирован и автоматизирован. Недостаток сварочного соединения — сравнительно низкая прочность швов при расслаивающих нагрузках, трудности соединения разнородных материалов и неразъемность соединения. Основными параметрами диффузионной сварки являются температура, продолжительность нагрева материала и давление на свариваемые детали. Длительность нагрева пластмасс во всех случаях должна быть минимальной во избежание деструкции материала. По той же причине не рекомендуется многократное повторение сварки. Вследствие низкого коэффициента теплопроводности в сварном шве возникают остаточные напряжения, для удаления которых необходимо применять медленное охлаждение или отжиг сваренного изделия.

Основные методы сварки термопластов:

- *газовая*, основной инструмент — газовая горелка. Газовой сваркой с присадочным материалом соединяют толстостенные детали из поливинилхлорида, полиэтилена, органического стекла, полистирола, капрона, полиформальдегида. Сварку нагретым газом с присадочным материалом ис-

- пользуют при футеровке травильных ванн, стыковке труб, листов линолеума, при изготовлении баков аккумуляторов и др. Недостатками являются низкая производительность и трудоемкость поддержания основных параметров технологического процесса сварки;
- *нагретым инструментом.* При этом методе соединяемые детали нагревают при контакте с горячими металлическими лентами, дисками, зажимами прессы и др. Способ применим для сварки толстостенных изделий (трубы, плиты и др.) и для пленок;
 - *нагретым присадочным материалом.* Этот способ заключается в том, нагретый присадочный материал в пластическом состоянии подается из нагревательного устройства на соединяемые поверхности и сплавляется с ним. После охлаждения получается однородная структура, обеспечивающая высокую прочность шва;
 - *током высокой частоты.* Сварка основана на разогреве полимеров при прохождении через них переменного электрического тока. При сварке токами высокой частоты можно точно отрегулировать основные параметры технологического процесса, что гарантирует высокое качество сварного шва. Этот метод целесообразно применять при серийном производстве из-за дороговизны оборудования;
 - *ультразвуковая сварка.* При этом методе разогрев соединяемых поверхностей происходит в результате пластических деформаций материала под влиянием ультразвуковых колебаний инструмента. Качество шва высокое. Можно сваривать разнородные материалы, разнотолщинные за счет локального разогрева соединяемых поверхностей, а также в труднодоступных местах;
 - *трением.* Сварка основана на преобразовании механической энергии в тепловую при трении вращающейся и неподвижной деталей;
 - *сварка с применением инфракрасного (ИК) излучения* основана на нагреве соединяемых поверхностей за счет поглощения ИК-излучения (источники ИК-излучения: кварцевые лампы, силитовые стержни, нихромовые сплавы);
 - *лазерная сварка.* При этом методе разогрев соединяемых поверхностей осуществляется лучом лазера, сфокусированным в пятно диаметром около 1 мм, который направлен перпендикулярно к свариваемому пакету. Лазер-

ная сварка применяется для соединения пленки толщиной 12...500 мкм. Мощные лазеры позволяют сваривать листы толщиной до 250 мм.

Другим методом неразъемного соединения материалов является *склеивание*.

Преимущества этого метода — можно склеивать разнородные материалы (металл—пластмасса, металл—керамика и др.).

Недостатком является невысокая теплостойкость, старение клея и пониженное сопротивление отрыва при неравномерной деформации. Прочность зависит от подготовки поверхности, природы материалов, соблюдения технологического процесса, а также от адгезии и когезии клея.

Адгезия — это, в данном случае, прилипание клея к материалу. *Когезия* — сцепление молекул внутри клеевого слоя за счет сил притяжения.

Данный метод эффективно используется в промышленности, например, для соединения фрикционных накладок к тормозным колодкам легковых автомобилей и др.

Клеи по природе подразделяют на животные (это продукты переработки кожи и костей животных, чешуи и костей рыб, а также молока), применяемые для склеивания бумаги, ткани и дерева и неорганические (это водные растворы минеральных солей, например, жидкое стекло, содержащее 30...40-процентный раствор силиката натрия, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$), они имеют высокую теплостойкость, но повышенную хрупкость.

Наибольшее распространение получили синтетические клеи. Они представляют собой растворы различных полимерных материалов в органических растворителях. Для улучшения свойств клеев в них вводят наполнители и стабилизаторы. Например, клеи на основе полистирола и органического стекла.

В настоящее время созданы теплостойкие клеи, например, полиуретановые, эпоксидные клеи можно эксплуатировать при температуре 250 °С, а клеи на основе кремнийорганических полимеров — до 1200 °С.

Для склеивания отвержденных реактопластов рекомендуются термореактивные клеи.

Для получения прочного клеевого соединения клей должен смачивать поверхность материала, силы адгезии должны быть равны силам когезии, необходимо избегать появления в клеевом слое больших остаточных напряжений.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит особенность переработки реактопластов в изделия?
2. Каковы особенности переработки термопластов?
3. Какие способы применяются при изготовлении изделий из термопластов?
4. Какие существуют способы переработки реактопластов в изделия?
5. Какие методы сварки применяют для соединения пластмасс?
6. Каковы преимущества и недостатки соединения пластмасс склеиванием?

3.6. Основы технологии электроэрозионной обработки

3.6.1. Электрофизические методы обработки

Электрофизический метод называется также *электроэрозионным методом обработки*, так как он основан на эрозии (разрушении) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока. При достижении определенной разности потенциалов на электродах в межэлектродной среде (газовой или лучше жидкостной) за счет ионизации образуется канал проводимости, по которому осуществляется импульсный искровой или дуговой разряд. Плотность тока в канале проводимости достигает больших значений (до 8000...10 000 А/мм²), а время разряда всего 1,0...10 с. При этих условиях на поверхности электрода-заготовки температура возрастает до 10 000...12 000 °С, что приводит к расплавлению и испарению элементарного объема металла. На обрабатываемой поверхности появляется лунка. Так продолжается до тех пор, пока не снимется слой металла и пока между электродами возможен электрический пробой при заданном напряжении импульса. Расстояние между электродами при обработке растет, и наступает момент прекращения обработки. Поэтому для продолжения обработки электроды необходимо сближать. На заготовку действуют электростатические и электродинамические силы, а также давление жидкости вследствие возникающей при импульсных разрядах *кавитации* (образование пузырьков, заполненных газом, паром или их смесью).

Электрофизическая обработка имеет четыре разновидности:

- *электроискровая обработка.* Она основана на использовании импульсного искрового разряда между заготовкой (анодом) и инструментом (катодом). Достигается точность обработки по 5, 6 квалитетам, а шероховатость поверхности $Ra = 1,25...0,16$ мкм. Обработка ведется в среде диэлектрической жидкости (керосин или минеральное масло), которая охлаждает продукты эрозии, препятствует нагреву электродов, уменьшает боковые разряды между инструментом и заготовкой. Для сохранения постоянного зазора станки для электроискровой обработки снабжают следящими системами и механизмом автоматической подачи инструмента. Для этой обработки выпускают различные станки. Электроискровая обработка широко применяется для проези пазов, вырезки по контуру, для изготовления штампов, пресс-форм, фильер, режущих инструментов и др. Хорошо обрабатываются твердые сплавы, тантал, вольфрам, молибден и др. Недостатки электроискровой обработки: сравнительно низкая производительность обработки, большой износ электродов и образование на деталях дефектного слоя толщиной $0,05...0,5$ мм;
- *электроимпульсная обработка.* Она заключается в использовании электроимпульсов большой длительности от 500 до 10 000 мкс. При этом происходит мощный дуговой разряд между поверхностями инструмента и заготовки, в этом случае быстрее разрушается катод. Поэтому при электроимпульсной обработке применяют обратную полярность включения электродов (в отличие от электроискровой обработки): заготовка — катод, а инструмент — анод. При этом методе обработки износ инструментов-электродов значительно меньше, чем при электроискровой обработке. Электроимпульсная обработка имеет большую производительность. Качество поверхности зависит от режимов обработки. Грубая обработка — $Ra = 50...6,3$ мкм, чистовая — $Ra = 6,3...1,25$ мкм. Обработка ведется в жидком диэлектрике, инструмент автоматически подается в направлении обработки, что обеспечивает постоянство зазора. Для обработки используются специальные станки разных моделей с машинными генераторами, высокочастотными установками, электронными генераторами и т. д. Высокочастотные станки с различными системами программного управления

позволяют изготавливать детали со сложными формами. Метод считается целесообразным для предварительной обработки фасонных поверхностей штампов, лопаток, инструментов. Применяется для обработки твердых нержавеющей и жаропрочных сплавов;

- *электроконтактная обработка.* При этом виде обработки используется локальный нагрев заготовки в месте ее контакта с электродом-инструментом. Источником образования теплоты в зоне обработки служат импульсные дуговые разряды, возникающие за счет быстрого перемещения инструмента относительно заготовки. Соприкосновение под небольшим давлением двух металлических электродов приводит в месте контакта к повышенному электрическому сопротивлению, разогреву, размягчению и плавлению материала заготовки. Затем разогретый или расплавленный металл удаляется из зоны обработки механическим путем за счет движения заготовки относительно инструмента. Рабочий инструмент, обычно в виде диска, не расплавляется из-за быстрого перемещения (скорость вращения диска 30...80 м/с) или охлаждения. Эта обработка не обеспечивает высокой точности и качества поверхности, но она высокопроизводительна. Применяется она для резки заготовок, обдирки отливок, заточки инструмента, плоского шлифования, прошивки отверстий, очистки от окалины, обработки криволинейных поверхностей и т. д. Рекомендуются для обработки углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких, труднообрабатываемых и специальных сплавов;
- *анодно-механическая обработка.* Эта обработка характеризуется протеканием в месте обработки нескольких процессов. Анод — заготовка, катод — инструмент (диски, цилиндры, ленты, проволока). Заготовке и инструменту сообщаются движения, аналогичные движениям при обработке резанием. В зону обработки подается электролит, которым чаще всего является водный раствор жидкого натриевого стекла. Пропускание постоянного тока через зону обработки приводит к анодному растворению, характерному для электрохимической обработки. В момент соприкосновения микронеровностей обрабатываемой поверхности заготовки с инструментом возникают электродуговые разряды, приводящие к электроэрозии. И, наконец, при контакте заготовки с ин-

струментом за счет появления кратковременных дуговых разрядов происходит процесс разогрева металла в локальных зонах, характерных для электроконтактной обработки. Размягченный металл и продукты анодного растворения и электроэрозии удаляются из зоны обработки. Для этой обработки выпускаются специальные станки с использованием системы ЧПУ. Программа управляет скоростями перемещений заготовки и инструмента, поддерживает постоянным зазор в рабочем пространстве, задает электрические режимы. Инструмент изготавливают из мягкой стали, меди, чугуна и др. материалов. Эта обработка пригодна для всех токопроводящих материалов.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют разновидности электрофизической обработки?
2. Какова сущность электроэрозионного метода обработки?
3. В чем сущность анодно-механической обработки?

3.6.2. Электрохимические методы обработки

В основу электрохимического метода обработки положен принцип анодного растворения, имеющий место при электролизе. При подаче постоянного тока в место обработки на поверхности заготовки (аноде) происходят химические реакции, превращая слой металла в химические соединения. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим путем. Получили распространение следующие способы:

- *электрохимическое полирование*. Оно проводится в ванне, заполненной электролитом, которым являются растворы кислот и щелочей (в зависимости от обрабатываемых поверхностей). Катодами служат металлические пластины. При подаче напряжения начинается процесс избирательного растворения металла поверхности заготовки. Вследствие большой плотности тока интенсивнее растворяются микровыступы. Так осуществляется сглаживание поверхности. Детали после такой обработки не имеют дефектного слоя, поэтому у них повышается коррозионная стойкость, предел

выносливости и контактная прочность. Эта обработка производится перед гальваническими покрытиями, для доводки режущего инструмента, для отделки проволоки, фольги и поверхностей деталей;

- *электрохимическая размерная обработка* проводится с прокачкой электролита под давлением между заготовкой и инструментом. Вновь поступивший свежий электролит способствует лучшему растворению металла поверхности заготовки и удалению продуктов анодного растворения. Прокачка предупреждает также осаждение металла на инструменте, что сохраняет его форму и размеры, т. е. долгую работоспособность. Съем металла проводится по всей поверхности заготовки, расположенной под инструментом. Участки заготовки, где не снимается металл, изолируются. Зазор при обработке возможно оставлять постоянным благодаря использованию следящих систем. Этот вид обработки применяют при изготовлении изделий сложных форм (лопатки, турбины и др.), для прошивки отверстий, оформления полостей штампов и т. п.;
- *электроабразивная и электроалмазная обработка*. Эти виды обработки осуществляются инструментами-электродами, которыми являются электропроводящие шлифовальные круги. Между заготовкой (анодом) и инструментом (катодом) за счет выступающих из связки зерен образуется межэлектродный зазор, куда подается электролит. Заготовка и шлифовальный круг совершают такие же движения, что и при механическом шлифовании. В результате обработки большая часть припуска удаляется за счет анодного растворения (до 90 % при электроабразивной и 75 % при электроалмазной обработках), остальная часть удаляется за счет механического воздействия абразивных и алмазных зерен. В связи с этим шероховатость поверхности деталей получается лучше, чем при обычных методах шлифования. Применяются эти виды обработки для отделки труднообрабатываемых и нежестких деталей.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы электрохимической обработки?
2. Какова сущность электрохимического полирования?

3.6.3. Ультразвуковая обработка и лучевые методы обработки

При ультразвуковой обработке происходит направленное разрушение материала абразивными зёрнами под ударами инструмента (латунь, медь, чугун), который колеблется с ультразвуковой частотой. Под ударами зёрен абразива скалываются мелкие частицы материала с поверхности заготовки. Точность обработки и шероховатость такие же, как и при шлифовании. Такая обработка применяется для прошивания отверстий различных сечений, узких пазов и изготовления деталей сложной конфигурации. Обработке подвергаются заготовки из хрупких, твердых материалов: керамики, стекла, кремния, кварца, ферритов, драгоценных минералов и др.

Электроннолучевой и светолучевой методы. Это разновидности лучевых методов формообразования поверхностей заготовок. Достижимые точности обработки — 7...9 качества, а шероховатость поверхности — $Ra = 1,25...0,8$ мкм. Необходимое для обработки перемещение электронного луча по поверхности заготовки осуществляется с помощью отклоняющей системы. Кроме того, в специальных электроннолучевых установках предусматриваются продольные и поперечные перемещения стола, на котором крепится заготовка. Все перемещения, а также продолжительность импульсов и интервалы между ними задаются системой программного управления. Электроннолучевая обработка обладает ценным преимуществом создания локальной концентрации высокой энергии, широким регулированием и управлением тепловыми процессами. Эта обработка весьма эффективна при получении отверстий малых диаметров (от 1 мм до 10 мкм), прорезании узких пазов, резке заготовок и т. п. Таким методом можно обрабатывать заготовки из различных труднообрабатываемых материалов: вольфрама, тантала, циркония, рубина, кварца, керамики и др.

Светолучевой станок с программным управлением применяется для обработки систем отверстий в электродах газоразрядных приборов, в деталях авиационной техники и др.

Контрольные вопросы

1. Что такое ультразвуковая обработка?
2. Для чего используются электроннолучевой и световой методы обработки?

3.7. Основы технологии упрочняющей обработки деталей машин

3.7.1. Качество машин

Качество машин определяется техническими, технологическими, производственными, организационными и экономическими факторами. Оно характеризуется показателями технологичности и эксплуатационными показателями технического уровня: служебного назначения, надежности, эргономичности, эстетичности и патентно-правовыми.

Важную роль в обеспечении надежности играет качество поверхности деталей машин. Кроме шероховатости поверхности, важными являются физико-механические свойства поверхностного слоя материала. Это более высокая поверхностная твердость и упрочнение, создание остаточных напряжений сжатия, а также соответствующие структурные и фазовые превращения в металле поверхностного слоя деталей. Управление качеством поверхности деталей машин осуществляется главным образом применением различных методов упрочняющей обработки. Методы упрочняющей обработки могут быть разделены на две большие группы: *без нанесения и с нанесением покрытий*.

К первой группе относятся:

- *методы механического воздействия*: обработка давлением поверхностным пластическим деформированием. Упрочняется поверхностный слой металлических деталей;
- *методы термической обработки*: объемная и поверхностная закалка, химико-термическая обработка, термомеханическая обработка, диффузионная металлизация. Обеспечивается изменение свойств поверхностного слоя за счет структурных превращений и изменения состава поверхностного слоя металла.

Во вторую группу входят:

- *плакирование*, при котором два и большее количество различных материалов соединяются литьем, прокаткой, сваркой, взрывом;
- *электролитические и химические методы нанесения покрытий*;
- *наплавка*;
- *газопламенное электродуговое напыление*.

Вторая группа методов достаточно эффективна для придания поверхностному слою изделий заданных свойств, позволяет восстанавливать изношенные детали и сравнительно нетрудоемка. Во вторую группу также входит *обработка плазменной струей*, отличающейся в силу ее энергетических возможностей (температура около 12 000 К) от традиционных методов нанесения покрытий.

3.7.2. Технологические способы упрочняющей обработки пластическим деформированием

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является процессом, обеспечивающим получение стабильных показателей по качеству поверхности. ППД подразделяется на *сглаживающее* и *упрочняющее*.

В результате обработки ППД образуется специфическая шероховатость поверхности, возникает упрочненный поверхностный слой металла и в нем формируются остаточные напряжения сжатия, изменяются макро- и микроструктуры, механические и физические свойства металлов. Достигаются высокие качества точности обработки, значительно повышаются эксплуатационные характеристики деталей машин.

Схемы основных видов ППД (рис. 3.26) таковы:

- *дробеструйная обработка* (рис. 3.26, а, б). Ее используют для упрочнения поверхности детали стальной или чугунной дробью, применяют и стеклянные шарики. Скорость вылета дроби из сопла пневматической головки или дробемета — 50...85 м/с.

Глубина и степень упрочнения, а также остаточные напряжения зависят от технологических факторов. Метод применяется для обработки лопаток турбин, рессор, пружин, зубчатых колес, спиральных сверл и др.;

- *центробежно-шариковый наклеп* (рис. 3.26, в) во многом аналогичен радиальному обжатию. Производится на станках общего (токарные, шлифовальные и др.) и специального назначения. Шарики располагаются в цилиндрических радиальных отверстиях упрочнителя-сепаратора;
- *обкатывание роликом и шаром* (рис. 3.26, г, д) является наиболее распространенным видом обработки ППД из-за

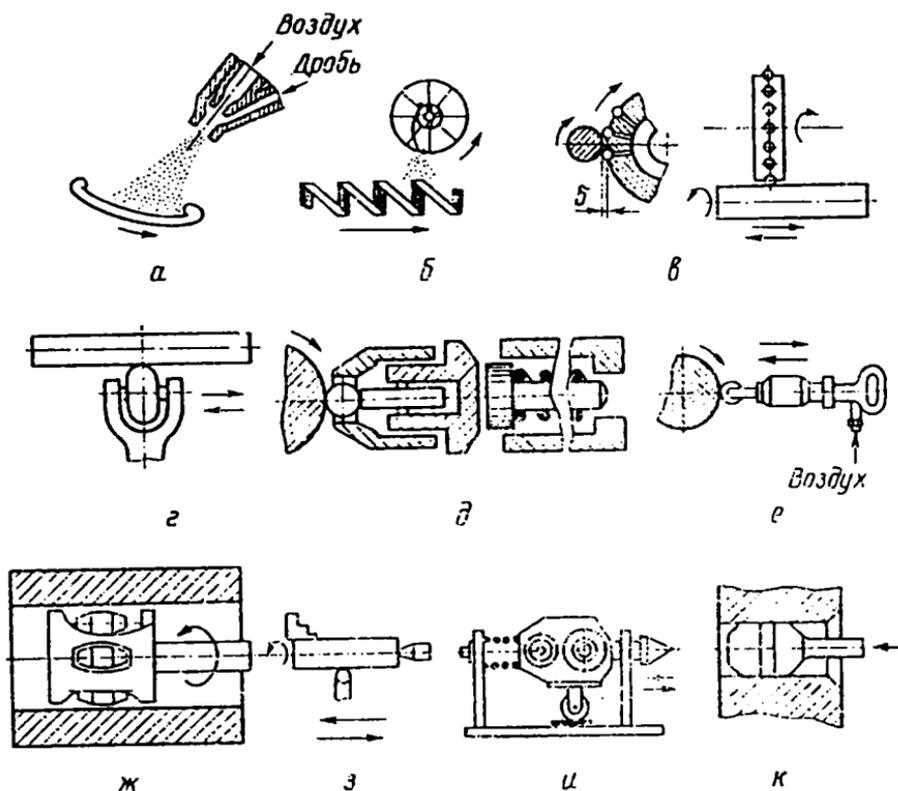


Рис. 3.26. Схемы основных видов поверхностного пластического деформирования: а, б — дробеструйная обработка; в — центробежно-шариковый наклеп; г, д — обкатывание роликом и шаром, е — обкатывание вибрирующим роликом; ж — раскатывание отверстий роликом; з — алмазное выглаживание; и — чеканка; к — дорнование

их мобильности и простоты. Ролики из сталей У10, У12, Х12 и др. закаливают на твердость 58...65 HRC. Ролики иногда наплавляют твердыми сплавами, что значительно повышает их износостойкость. Для закрепления роликов и шаров существуют специальные устройства и приспособления;

- *метод обкатывания вибрирующим роликом* (рис. 3.26, е) позволяет добиться требуемой степени деформации при сравнительно небольших усилиях и в соответствии со служебным назначением детали управлять процессом формирования шероховатости поверхности;

- *раскатывание отверстий роликами* (рис. 3.26, ж). В этот метод заложен принцип наружного обкатывания. Обкатывание цилиндрических, фасонных, плоских поверхностей и раскатывание отверстий весьма эффективны и широко применяются при отделке разнообразных деталей машин. Обрабатываемые изделия — штоки штампованных молотов, различные валы, рабочие профили зубчатых валков, крупная резьба, обширная номенклатура деталей автомобилей и тракторов и другие изделия;
- *алмазное выглаживание* (рис. 3.26, з) отличается сравнительно малой площадью контакта инструмент—деталь, поэтому применяется при обработке нежестких деталей, прочных и закаленных материалов. Алмазное выглаживание наружных, внутренних фасонных поверхностей аналогично обработке роликами и шарами. При алмазном выглаживании обработка ППД проводится в условиях трения скольжения (с весьма малым коэффициентом трения), а при обкатке роликами и шарами — трения качения. Рабочим инструментом служат простые по конструкции державки с наконечниками из натуральных и искусственных алмазов в виде полусферы, цилиндра или конуса. Выглаживают жестким или нежестким (подпружиненным) инструментом. Номенклатура деталей, обрабатываемых алмазными выглаживателями, чрезвычайно велика;
- при *чеканке* (рис. 3.26, и) наносят удары ударниками с бойками по обрабатываемой поверхности при помощи механических, пневматических или электромеханических специальных приспособлений. После чеканки твердость поверхности возрастает на 30...50 %, глубина упрочнения — до 30 мм. Чеканка эффективна для обработки деталей машин, таких как зубчатые колеса, шлицевые валы из различных материалов. Хорошо упрочняются чеканкой сварные швы;
- *дорнование* (рис. 3.26, к). Это эффективный метод калибрования и отделки внутренних поверхностей деталей машин. Инструмент перемещается в отверстия с натягом, он является основным технологическим параметром процесса. Процесс выполняется за один или несколько проходов инструмента. Калибрование повышает точность отверстия и обеспечивает высокое качество поверхности. Процесс производителен.

3.7.3. Технологические способы упрочняющей обработки наплавкой, напылением, нанесением покрытий на рабочие поверхности деталей

Наплавка — это эффективный технологический способ поверхностной упрочняющей обработки. Он заключается в нанесении слоя металла на оплавленную металлическую поверхность путем плавления присадочного материала теплотой кислородно-ацетиленового пламени или электрической дуги. Наплавка значительно улучшает эксплуатационные показатели и повышает срок службы деталей машин. Кроме того, наплавкой восстанавливают изношенные детали. При проведении наплавочных работ широко используют ленточные электроды. Наплавка находит широкое применение в производстве металлургического оборудования, строительных и буровых машин, штампового инструмента и др.

Напыление — это также эффективный способ поверхностной упрочняющей обработки. Напыление является процессом нанесения покрытий с помощью высокотемпературной струи, которая переносит нагретые до плавления или близкого к нему состояния частицы распыляемого материала, осаждающиеся на металл детали при столкновении с ее поверхностью. При этом используется теплота кислородно-ацетиленового пламени или дугового разряда в газовой среде. Напыляемыми материалами могут быть: металлическая проволока, керамические прутки, порошковые металлические или керамические материалы. Напыление применяют для повышения надежности и восстановления изношенных деталей.

Широко распространен способ *электролитического металлопокрытия*. Сущность этого метода заключается в осаждении металла из электролита с образованием покрытия на поверхности детали. При этом пропускается ток между пластиной из наносимого на деталь металла (анода) и обрабатываемым изделием (катодом). Основные методы: никелирование (для повышения коррозионной стойкости и восстановления изношенных деталей) и хромирование (для повышения коррозионной стойкости, износоустойчивости, поверхностного упрочнения и восстановления изношенных деталей машин).

Химическое металлопокрытие (кадмиевое, медное, никелевое и др.) получают как следствие осаждения из водного раствора

хлорида металла ионов без пропускания через него электрического тока. Простые химические покрытия на поверхности металлических деталей получают путем погружения и выдержки их в соответствующих растворах. Образующиеся неметаллические покрытия (оксидные, фосфатные и др.) на деталях из алюминия, магния, меди и стали в основном направлены на повышение коррозионной стойкости деталей машин.

Контрольные вопросы

1. Для чего необходимо упрочнять поверхности деталей и заготовок?
2. На какие группы можно подразделить методы упрочняющей обработки?
3. Какие существуют способы упрочняющей обработки методом пластического деформирования?
4. В чем заключаются способы упрочнения поверхности наплавкой, напылением?

Раздел 4

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4.1. Автоматизация электроснабжения и освещения

4.1.1. Автоматизация систем электроснабжения

Автоматизация в системах электроснабжения потребителей призвана обеспечивать защиту оборудования и исключать аварийные режимы его работы, осуществлять постоянный контроль за параметрами сети и оборудования, переключать питание при необходимости с одной линии на другую. Благодаря автоматизации повышается надежность работы электроустановок, сокращается количество обслуживающего персонала, что уменьшает эксплуатационные расходы и способствует сокращению числа аварий по вине персонала.

Как известно из Правил устройства электроустановок, все электрические приемники потребителей электроэнергии подразделяют на три категории в отношении надежности электроснабжения.

К первой категории относят электрические приемники, перерыв в электроснабжении которых представляет опасность для жизни людей, может нанести значительный ущерб народному хозяйству, привести к массовому браку продукции, расстройству сложного технологического процесса, нарушить особо важные элементы городского хозяйства. Например, сооружения с массовым скоплением людей (метро, театры, крупные стадионы и т. п.), операционные лечебных учреждений и родильных до-

мов, технические и силовые установки, определяющие работоспособность радиосвязи, телефона, противопожарных, водопроводных установок и т. п.

Потребители первой категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых питающих линий, а в ряде случаев — иметь свои автономные (аварийные) источники питания.

Ко второй категории относят электрические приемники, перерыв в электроснабжении которых связан с простоем рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушением нормальной деятельности значительного количества городских жителей (это все здания высотой более пяти этажей, административные общественные здания, лечебные и детские учреждения, школы и учебные заведения, центральные тепловые пункты и т. д.). Для этой категории допустим перерыв электроснабжения на время, необходимое для включения резерва вручную обслуживающим персоналом.

К третьей категории относят все остальные токоприемники, не вошедшие в первую и вторую категории.

Наиболее часто встречаются устройства автоматики: автоматическое повторное включение (АПВ) и автоматическое включение резерва (АВР).

АПВ предназначено для быстрого автоматического восстановления питания потребителей после самоликвидации кратковременных коротких замыканий.

Цикл АПВ: время от момента подачи сигнала на отключение выключателя до его повторного включения выбирается таким, чтобы:

- за время бестоковой паузы успело произойти восстановление изоляции в месте ее нарушения;
- выключатель был готов к повторному включению;
- после включения выключатель мог отключить поврежденную цепь в случае ее невозможности восстановления.

АВР — это наиболее эффективный способ обеспечения потребителей электроэнергией. Он предусматривает наличие двух электрических соединений с источником питания или двух источников питания и соединение каждого со своей группой нагрузки. В первом случае нарушение электроснабжения восстанавливается автоматически включением резервной линии секционным выключателем. Питание потребителей при этом переводится на одну линию или на один трансформатор. Во втором случае

включается резервный источник питания после отключения рабочего источника. Эффективное действие АВР обеспечивается при достаточной мощности резервного источника питания или автоматической разгрузкой по току (отключение потребителей) при необходимости.

4.1.2. Автоматизация управления освещением

На освещение мест общего пользования жилых, административных и общественных зданий затрачивается много электроэнергии. Автоматизация управления освещением позволяет установить оптимальный режим работы осветительной сети, что дает экономию электроэнергии и снижает эксплуатационные расходы.

В настоящее время применяются три основные схемы дистанционного автоматического включения освещения лестничных клеток и этажных коридоров зданий:

- дистанционное включение освещения с помощью кнопочных автоматов с выдержкой времени на отклонение;
- управление с помощью фотовыключателей;
- управление с помощью фотовыключателей и реле времени.

Первая схема представляет собой диспетчерское дистанционное управление, осуществляемое в директивные сроки. Такая схема, как правило, имеет несколько цепей и, соответственно, автоматических выключателей. Эта схема — пример децентрализованного управления.

Вторая схема работает в автоматическом режиме. Сигнал на включение осветительной сети вырабатывается фотодатчиками, которые устанавливаются в нескольких контрольных точках. При наступлении темноты во всех точках вырабатывается сигнал на включение осветительной сети. При дневном освещении аналогично происходит отключение сети. Эта схема обычно применяется в помещениях с естественным освещением. Управление освещением по данной схеме происходит централизованно.

Третья схема работает так же, как и вторая, но в ней предусматривается возможность с помощью реле времени отключать часть освещения в ночное время. Эта схема — пример автоматического программного управления осветительной сетью.

Применение каждой из трех схем определяется технической и экономической целесообразностью.

Автоматический выключатель устанавливается на лестничных площадках и обеспечивает включение освещения на период от полутора до трех минут. Выдержка времени обеспечивается специальным пневматическим устройством.

В специализированном фотореле для управления освещением в качестве чувствительного элемента использовано фотосопротивление. Внутреннее сопротивление его находится в обратной зависимости от освещенности. С наступлением темноты величина сопротивления возрастает, и падение напряжения на нем увеличивается. Это напряжение оказывается достаточным для зажигания неоновой лампочки (МН), ток протекает и поступает на реле (чувствительное поляризованное). Оно срабатывает и включает исполнительное реле, которое коммутирует цепь освещения. В настоящее время промышленность выпускает большое количество фотореле различных типов и конструкций, пригодных для использования в устройствах автоматического управления освещением. В качестве чувствительных элементов в фотореле могут быть использованы фотодиоды, фотосопротивления, фототранзисторы.

В домах выше 12 этажей применяется программное управление освещением, переключающее в ночные часы рабочее освещение на аварийное, что позволяет иметь минимально необходимое освещение и получить значительную экономию электроэнергии. Для этого в схему управления вводят специальное моторное реле времени с часовым механизмом. Принцип работы реле заключается в том, что электродвигатель через редуктор приводит во вращение программный диск с двумя кулачками, которые воздействуют на выходные контакты. Существенная экономия электроэнергии может быть получена при автоматизации управления освещением некоторых помещений в школах, больницах и зданиях другого типа. Например, в школах отключают на время уроков часть освещения коридоров и некоторых других помещений. Аварийное освещение на период проведения уроков не отключается и управляется фотореле. Управление наружным освещением — сложная техническая задача, так как в условиях крупных городов это десятки тысяч светильников, зажигаемых и отключаемых в определенное время, это большие мощности электроэнергии, одновременно подключаемые к

энергосистеме и отключаемые от нее, это специальные длинные линии управления.

В настоящее время приняты две системы управления освещением: дистанционное с ограниченной зоной действия на квартал (улицу, площадь) и централизованное с зоной действия на микрорайон (район, город).

Особую трудность в организации управления наружным освещением представляет устройство электрического соединения аппаратуры управления и светильников. В качестве линий соединения применяются: специально проложенные линии (воздушные или кабельные), силовые линии электросетей (воздушные или кабельные), кабели городской телефонной сети.

Специальные линии управления наиболее просто решают вопрос электрического соединения. Они удобны и надежны в эксплуатации, но их устройство связано с большими затратами.

Силовые линии электросетей позволяют передавать по ним одновременно и команды управления. Для устройства такого электрического канала необходима специальная аппаратура. Условия эксплуатации канала требуют особого режима, так как его работа связана с двумя самостоятельными электрическими системами: управление наружным освещением и силовым электропитанием.

Городская телефонная сеть имеет наиболее развитые электрические каналы, позволяющие также одновременно использовать их для передачи команд управления. При использовании телефонных линий для управления наружным освещением напряжение команд ограничивается 60 В постоянного тока. Это вызвано тем, что фон переменного тока может мешать телефонным переговорам, а напряжение лимитируется изоляционными свойствами телефонного кабеля.

Электрическая схема дистанционного (местного) управления наружным освещением выполняется на тех же аппаратах, какие применяются для освещения внутри зданий, в том числе и фото-выключатели. Аппараты управления и коммутации устанавливаются на каждом из освещаемых участков территории. При этом управление освещением может осуществляться из одного или нескольких мест.

Централизованное управление наружным освещением, как правило, осуществляется из одного пункта (диспетчерской) и предусматривает отключение части освещения в ночное время, а также получения информации о состоянии освещения. В связи с

более широкими задачами централизованной системы (управление, контроль и сигнализация) для ее устройства применяется более сложная аппаратура и требуется квалифицированное обслуживание.

При большой протяженности цепей управления и одновременном включении многих контакторов применяют каскадную схему централизованного управления, осуществляющую последовательное включение секций осветительной сети. Однако эта схема имеет недостаток — нарушение всей цепи управления освещением при аварии на одном из силовых питательных пунктов.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют категории электрических приемников?
2. Каково назначение устройств автоматики АПВ и АВР?
3. Каким образом управляется освещение на лестничных площадках и в этажных коридорах?
4. Какие элементы используются в качестве чувствительных?
5. Какие системы управления освещением применяются?
6. Какие линии соединений применяются при управлении освещением?

4.2. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования

4.2.1. Автоматизация систем вентиляции

4.2.1.1. Общие сведения о вентиляции

Современные условия жизни человека требуют эффективных искусственных средств оздоровления воздушной среды. Этой цели служит техника вентиляции.

К факторам, вредное воздействие которых устраняется с помощью вентиляции, относятся: избыточное тепло (конвекционное, вызывающее повышение температуры воздуха) и лучистое; избыточные водяные пары — влага; газы и пары химических веществ общетоксического или раздражающего действия; токсическая и нетоксическая пыль; радиоактивные вещества.

В помещениях, где бывает много людей (зрелищные предприятия, магазины и др.), тепловыделения создают неблагоприятные условия, вредно отражающиеся на самочувствии, здоровье и работоспособности людей.

В цехах и отделах промышленных предприятий избыточное тепло возникает при значительных тепловыделениях машинами, станками, производственной аппаратурой, нагревательными печами, трубопроводами, нагретыми изделиями, остывающими в помещении, людьми, от солнечной радиации и от других источников тепла. При отсутствии вентиляции, перечисленные и другие тепловыделения значительно повышают температуру воздуха и затрудняют процесс терморегуляции в организме человека и, кроме того, могут отрицательно влиять на технологический процесс производства.

Воздушная среда в помещении, удовлетворяющая санитарным нормам, обеспечивается в результате удаления загрязненного воздуха из помещения и подачи чистого наружного воздуха. Соответственно этому системы вентиляции подразделяют на *вытяжные и приточные*.

По способу перемещения удаляемого из помещений и подаваемого в помещения воздуха различают вентиляцию *естественную (неорганизованную и организованную)* и *механическую (искусственную)*.

Под *неорганизованной естественной вентиляцией* понимают воздухообмен в помещениях, происходящий под влиянием разности давлений наружного и внутреннего воздуха и действия ветра через неплотности ограждающих конструкций, а также при открывании форточек, фрагуг и дверей.

Воздухообмен — это частичная или полная замена воздуха, содержащего вредные выделения, чистым атмосферным воздухом.

Воздухообмен, происходящий также под давлением разности давлений наружного и внутреннего воздуха и действия ветра, но через специально устроенные в наружных ограждениях фрагуги, степень открытия которых с каждой стороны здания регулируется, является *вентиляцией естественной, но организованной*. Этот вид вентиляции называется *аэрацией*.

Механической, или искусственной, вентиляцией называется способ подачи воздуха в помещение или удаления из него с помощью вентилятора.

Системы механической вентиляции, автоматически поддерживающие в помещениях метрологические условия на уровне заданных независимо от изменяющихся параметров внешней воздушной среды, называются *системами кондиционирования воздуха* (condition — условие).

По способу организации воздухообмена в помещениях вентиляция может быть общей, местной, локализирующей, смешанной и аварийной.

Общая вентиляция, называемая общеобменной, предусматривается для создания одинаковых условий воздушной среды (температуры, влажности, чистоты воздуха и его подвижности) во всем помещении.

Местная вентиляция создает местные (на рабочих местах), отвечающие гигиеническим требованиям условия воздушной среды, отличные от условий в остальной части помещения. Примером может служить воздушный душ — струя воздуха, направленная непосредственно на рабочее место.

Локализирующая вентиляция заключается в улавливании вредных выделений непосредственно у производственных установок с помощью специальных укрытий, предотвращающих поступление вредных выделений в помещение.

Смешанные системы, применяемые главным образом в производственных помещениях, представляют собой комбинации общеобменной вентиляции с местной.

«Аварийные» вентиляционные установки предусматривают в помещениях, в которых возможно внезапное неожиданное выделение вредных веществ в количествах, значительно превышающих допустимые. Их включают только в тех случаях, если необходимо быстро удалить вредные выделения.

Вопрос о том, какую из перечисленных систем вентиляции следует устраивать, решается в каждом конкретном случае в зависимости от назначения помещения, характера вредных выделений, возникающих в нем, и схемы движения воздушных потоков внутри здания.

4.2.1.2. Естественная вентиляция

Пористость ограждающих конструкций зданий, а также строительные неплотности в них при разности давлений внутреннего и наружного воздуха обуславливают воздухообмен в помещении, происходящий в результате инфильтрации.

Чем больше разность температур внутреннего и наружного воздуха и чем больше скорость движения ветра, тем больше разность давлений, а следовательно, и количество проникающего в помещение наружного воздуха (инfiltrация). Кратность воздухообмена за счет инfiltrации в жилых и общественных зданиях обычно 0,5...0,75 в зависимости от степени уплотнения щелей (например, замазка окон на зиму и др.). В промышленных зданиях инfiltrация нередко составляет 1,5-кратный обмен и более.

Инfiltrация, или, иначе, естественная неорганизованная вентиляция, наблюдается во всех помещениях и учитывается при организации вентиляции.

Для усиления вытяжки загрязненного воздуха из различных помещений применяют дефлекторы. Это специальные насадки, устанавливаемые на концах труб или шахт, а также непосредственно над вытяжными отверстиями в крышах производственных зданий. Работа дефлектора основана на использовании энергии потока воздуха — ветра, который, ударяясь о поверхность дефлектора и обтекая его, создает возле большей части его периметра разрежение, что и усиливает вытяжку воздуха из помещения. Дефлекторы изготовляют различной конструкции и размеров. Их рекомендуется устанавливать в наиболее высоких точках, непосредственно обдуваемых ветром.

Аэрацией зданий называется организованный и управляемый естественный воздухообмен через открывающиеся фрамуги в окнах и вентиляционно-световые фонари с использованием теплового и ветрового давлений. Аэрация широко применяется в производственных зданиях с большими тепловыми избытками и позволяет осуществлять воздухообмены, достигающие миллионов кубических метров в 1 ч.

Тепловое давление, в результате которого воздух поступает в помещение и выходит из него, образующееся за счет разности температур наружного и внутреннего воздуха, регулируется различной степенью открытия фрамуг и фонарей.

4.2.1.3. Механическая вентиляция

Системы механической вентиляции по сравнению с естественной более сложны в конструктивном отношении и требуют больших первоначальных затрат и эксплуатационных расходов.

Но в тоже время они имеют ряд преимуществ. К основным их достоинствам относятся:

- независимость от температурных колебаний наружного воздуха и его давления, а также скорости ветра;
- подаваемый и удаляемый воздух можно перемещать на значительные расстояния;
- воздух, подаваемый в помещения можно обрабатывать, т. е. нагревать или охлаждать, очищать, увлажнять и осушать.

Вследствие этого механическая вентиляция, как приточная, так и вытяжная, получила весьма широкое применение, особенно в промышленности.

Приточные системы механической вентиляции состоят из следующих конструктивных элементов:

- воздухоприемного устройства, через которое наружный воздух поступает в приточную камеру;
- приточной камеры с оборудованием для обработки воздуха и подачи его в помещения;
- сети каналов и воздуходувов, по которым воздух вентилятором распределяется по отдельным вентилируемым помещениям;
- приточных отверстий с решетками или специальных приточных насадок, через которые воздух из приточных каналов поступает в помещения;
- регулирующих устройств в виде дроссель-клапанов или задвижек, устанавливаемых в воздухоприемных устройствах, на ответвлениях воздухопроводов и в каналах.

Вытяжные системы механической вентиляции обычно состоят из следующих элементов:

- жалюзийных решеток и специальных насадок, через которые воздух из помещений поступает в вытяжные каналы;
- вытяжных каналов, по которым воздух, извлекаемый из помещений, транспортируется в сборный воздуховод;
- сборных воздухопроводов, соединенных с вытяжной камерой;
- вытяжной камеры, в которой установлен вентилятор с электродвигателем;
- оборудования для очистки воздуха, если удаляемый воздух сильно загрязнен;
- вытяжной шахты, служащей для отвода в атмосферу воздуха, извлекаемого из помещений;
- регулирующих устройств (дроссель-клапанов или задвижек).

Отдельные приточные и вытяжные системы механической вентиляции могут не иметь некоторых из перечисленных элементов.

В настоящее время в общественных и производственных зданиях устраивают преимущественно механическую вентиляцию, в которой воздух перемещается по сети воздуховодов и другим элементам системы с помощью центробежных и осевых вентиляторов, приводимых в действие электродвигателями.

Центробежные вентиляторы. Их работа заключается в следующем: при вращении рабочего колеса воздух поступает через входное отверстие в каналы между лопатками колеса, под действием центробежной силы перемещается по этим каналам, собирается спиральным кожухом и направляется в его выходное отверстие. Таким образом, воздух в центробежный вентилятор поступает в осевом направлении и выходит из него в направлении, перпендикулярном оси.

По создаваемому давлению центробежные вентиляторы подразделяются на группы: низкого давления — до 1000 Па (100 кгс/м²); среднего давления — до 3000 Па (300 кгс/м²); высокого давления — до 12 000 Па (1200 кгс/м²). Более широкое применение находят центробежные вентиляторы низкого давления. Центробежные вентиляторы высокого давления используют для пневматического транспорта и других производственных целей.

Простейший осевой вентилятор состоит из рабочего колеса, закрепленного на втулке и насаженного на вал электродвигателя, и кожуха (обечайки), назначение которого — создавать направленный поток воздуха. При вращении колеса возникает движение воздуха вдоль вентилятора, что и определяет его назначение. Осевые вентиляторы по сравнению с центробежными имеют следующие преимущества конструктивного характера: имеют меньшую массу, компактны, их можно включать непосредственно в сеть воздухопроводов, реверсивны (при симметричном профиле лопаток). Но по сравнению с центробежными они создают при работе больший шум и не способны перемещать воздух на большие расстояния.

Крышные вентиляторы представляют собой вентиляционные агрегаты, приспособленные для установки вне помещений на бесчердачном покрытии производственных и общественных зданий вместо большого числа вытяжных шахт или аэрационных фонарей.

Вентиляторы подбирают по расчетной производительности и требуемому давлению вентилятора, пользуясь рабочими характеристиками. Подбирая вентилятор, следует стремиться к тому, чтобы требуемым величинам давления и подачи соответствовало максимальное значение КПД. Тип электродвигателя к вентилятору выбирается с учетом условий эксплуатации.

4.2.2. Автоматизация систем кондиционирования воздуха

4.2.2.1. Кондиционирование воздуха. Общие сведения

Кондиционирование воздуха относится к наиболее современным и технически совершенным способам создания и поддержания в помещении комфортных для человека условий и оптимальных параметров воздушной среды для производственных процессов, обеспечения длительной сохранности ценностей культуры и искусства в общественных зданиях и т. п. Кондиционирование воздуха является большим достижением науки и техники в деле создания искусственного климата в закрытых помещениях.

Современная установка кондиционирования воздуха представляет собой комплекс технических средств, служащих для приготовления, перемещения и распределения воздуха, автоматического регулирования параметров, дистанционного контроля и управления.

Особенностью систем кондиционирования воздуха является наличие систем автоматики, обеспечивающих устойчивый искусственный микроклимат независимо от внешних условий и технологических процессов, протекающих в помещении.

Системы кондиционирования воздуха разделяют на центральные и местные, круглогодичные и сезонные (для теплого и холодного периода года). В центральных системах кондиционирования воздуха кондиционер, где происходят все процессы обработки воздуха, устанавливаются вне обслуживаемых помещений, и его раздача ведется по сети воздухопроводов. Такие системы обслуживают как отдельные большие помещения, так и группы помещений. В общественных и промышленных зданиях с различными требованиями к воздушной среде по отдельным помещениям или с различным тепловлажностным режимом устраивают многозональные центральные системы кондиционирования.

ния воздуха. В этих случаях здание разделяют в отношении обслуживания на зоны, в каждую из которых воздух подается со своими параметрами. Центральные кондиционеры выполняют с форсуночными и поверхностными воздухоохладителями. Комбинируя типовые секции, можно составлять кондиционер с любой схемой обработки воздуха.

Системы кондиционирования воздуха, предназначенные для круглогодичной и круглосуточной работы, совмещенные с отоплением здания, должны быть оборудованы не менее чем двумя кондиционерами производительностью по 50 % общей производительности системы.

В местных системах кондиционирования воздуха кондиционер размещают обычно в кондиционируемом помещении в виде подоконных, шкафных или подвесных агрегатов производительностью до 10^3 м³/ч. Такие системы применяют в небольших помещениях — лабораториях, отдельных гостиничных номерах, кабинетах и т. п.

При проектировании любых установок кондиционирования воздуха необходимо составлять тепло-влажностные балансы помещений, в которых должны быть учтены все факторы, влияющие на изменение состояния воздушной среды в самом помещении, а при центральных системах — еще и факторы, влияющие на изменение состояния приточного воздуха при транспортировании его от кондиционера до помещения.

4.2.2.2. Автоматизация систем кондиционирования

Важную роль в современной технике и технологии играет система кондиционирования. Она обеспечивает заданный по технологическим и гигиеническим требованиям состав воздушной среды. Автоматизация кондиционирования позволяет поддерживать с большой точностью стабильность среды, ее программное изменение, контроль, защиту, сигнализацию, а при необходимости — и устранение аварийных ситуаций. Правильные решения автоматизации кондиционирования позволяют рационально использовать теплоту, холод, а следовательно, и электроэнергию, что может составить значительную экономию в топливно-энергетическом балансе страны.

Автоматизация кондиционирования имеет свою специфику, так как состав воздуха зависит от химических (газовый состав) и климатических (влажность, температура) параметров и может

требоваться их регулирование в широком диапазоне. Кроме того, при круглогодичном кондиционировании различают летний и зимний режимы, а переход с одного режима на другой осуществляют без перерыва по наружным условиям.

Систему кондиционирования воздуха можно представить как систему автоматического регулирования с последовательным включением отдельных звеньев, предназначенных в конечном итоге для достижения одной цели — сохранения в помещениях температуры или относительной влажности, или температуры и относительной влажности одновременно. Каждое звено есть отдельный аппарат для обработки воздуха, включаемый последовательно по мере прохождения воздуха через установку кондиционирования. Важным вопросом автоматизации является правильный выбор места установки датчиков.

Создание автоматизированной системы кондиционирования обычно начинают с разработки технологического плана помещения и выделения различных зон, влияющих на микроклимат. Этот план преобразуют в зонный график, на который наносят также необходимые параметры воздушной среды. График является исходным заданием для создания автоматизированной установки кондиционирования и определения принципов ее управления. Далее идет этап разработки технологии приготовления воздуха по заданным параметрам. Приготовление воздуха включает его подогрев до установленной температуры точки росы, фильтрацию, увлажнение и догрев до требуемых параметров.

Точкой росы называют температуру, при которой из воздуха, при его охлаждении, выпадает влага в виде тумана и капелек росы. Каждому состоянию (влажность, давление, теплосодержание) соответствует своя температура точки росы (ТТР).

Фильтрация приточного воздуха осуществляется чаще всего с помощью самоочищающегося фильтра. Он представляет собой непрерывно движущуюся сетку, проходящую через ванну с маслом. Пыль, находящаяся в воздухе, прилипает к масляной пленке, покрывающей ячейки сетки, при прохождении сетки через ванну пыль смывается и оседает на дно масляной ванны, откуда она периодически удаляется. Увлажнение воздуха происходит в оросительной камере, где через форсунки разбрызгивается вода.

Особым условием кондиционирования является охлаждение воздуха в заданных пределах. Существуют два способа охлаждения: сухой и мокрый. При первом способе охлаждение воздуха происходит путем пропускания холодной воды через калорифе-

ры. При этом влагосодержание воздуха остается неизменным. Второй способ заключается в охлаждении воздуха в оросительных камерах при одновременном повышении его влагосодержания. Хладоносителем может быть водопроводная вода или вода специальных артезианских скважин, или вода, охлажденная в холодильных машинах. Как следует из технологии приготовления воздуха, процесс каждого этапа имеет свой контролируемый параметр и, следовательно, должен иметь свою систему автоматического регулирования.

Контрольные вопросы

1. Что относится к факторам вредного воздействия?
2. Что такое естественная и механическая вентиляция?
3. Как классифицируется вентиляция в зависимости от организации воздухообмена?
4. Как осуществляются естественная организованная и неорганизованная вентиляция?
5. Что такое аэрация зданий?
6. Какие виды механической вентиляции существуют?
7. Чем отличаются центробежные вентиляторы от осевых и где они применяются?
8. Какие виды кондиционирования существуют?
9. В чем заключается автоматизация систем кондиционирования?

4.3. Автоматизация систем отопления

4.3.1. Общие сведения об отоплении

Гигиенические исследования микроклимата помещений и того, как влияют изменения его отдельных компонентов на организм человека, позволили выработать определенные требования к системам отопления.

Основные из них заключаются в следующем:

- любая система отопления должна возмещать потери тепла помещением через все его теплоображающие конструк-

- ции — наружные стены, наружные двери, окна, чердачное перекрытие или бесчердачное покрытие и пол;
- система отопления должна независимо от колебаний наружной температуры воздуха поддерживать внутри помещений в зависимости от их назначения установленную гигиеническими нормами температуру;
 - температура внутреннего воздуха должна быть возможно равномерной как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Температура считается равномерной, если в горизонтальном направлении от окон до противоположной стены разница температуры воздуха не превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в вертикальном — $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на каждый метр высоты;
 - колебание температуры воздуха в течение суток не должно быть больше $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ при печном отоплении и $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ — при центральном;
 - внутренние поверхности ограждений (стены, потолок, пол) должны нагреваться настолько, чтобы температура их приближалась к температуре воздуха помещения;
 - средняя температура поверхности нагревательных приборов в жилых помещениях не должна превышать $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, она регламентирована и для приборов, установленных в помещениях другого назначения;
 - в жилых и общественных зданиях система отопления вместе с системой вентиляции должна обеспечивать поддержание относительной влажности φ и скорости движения воздуха ω в пределах гигиенических ($\varphi = 40\text{...}60\%$, $\omega = 0,15\text{...}0,25\text{ м/с}$);
 - в производственных помещениях система отопления вместе с системой вентиляции должна обеспечивать нормальные условия работы и температурно-влажностный режим, задаваемый технологическим процессом производства;
 - система отопления должна быть индустриальной в изготовлении и монтаже, экономичной в эксплуатации и безопасной в пожарном отношении.

4.3.2. Виды систем отопления

Различают местные и центральные системы отопления. К местным системам отопления относят системы, радиус действия которых ограничивается одним или несколькими, но смеж-

ными помещениями. Все конструктивные элементы этой системы объединены в одном устройстве. Наиболее типичным примером данного вида отопления является печное отопление. К местному отоплению относятся также газовое (при сжигании газа в отопительных приборах) и электрическое отопление с использованием приборов переносного типа (радиатора, калорифера и др.). В центральных системах тепло для отопления вырабатывается за пределами отапливаемых помещений (котельная, ТЭЦ), а затем транспортируется по трубопроводам или воздуховодам в отдельные помещения здания. По виду теплоносителя центральные системы отопления подразделяются на системы водяного, парового, воздушного и комбинированного.

В системах водяного отопления подготовка теплоносителя производится в водогрейном чугунном секционном котле, установленном в подвале здания. Из котла теплоноситель (горячая вода) поступает по трубопроводу в отопительные приборы, расположенные в разных помещениях и этажах здания. Через стенки приборов теплоноситель отдает большую часть тепла воздуху помещения и по трубопроводу возвращается в котел для восстановления своего теплового потенциала. Системы водяного отопления могут быть с искусственной и естественной циркуляцией. В системах с искусственной циркуляцией в дополнение к естественному давлению, возникающему в результате охлаждения воды в приборах и трубах, значительно большее давление создается насосом.

В системах парового отопления теплоноситель пар, поступая по трубопроводу в отопительные приборы, конденсируется, отдавая теплоту парообразования для отопления помещений. Конденсат из приборов возвращается обратно в котел. Пар является весьма транспортабельным теплоносителем. Вследствие большой скорости движения пара и значительного количества тепла, которое он отдает, конденсируясь в приборах, требуются меньшие диаметры трубопроводов, чем при водяном отоплении. Пар является более активным теплоносителем, чем вода. Он обеспечивает быстрый обогрев помещений и позволяет тотчас же прекратить работу системы. Системы парового отопления подразделяют по величине начального пара, способу возврата конденсата в котел или в тепловую сеть, месту расположения паропровода и схеме стояков.

Для систем воздушного отопления воздух нагревается непосредственно в обслуживаемых этими системами зданиях. Ото-

пление помещений осуществляется централизованно по специальным каналам (воздуховодам) или сосредоточенной подачей воздуха и децентрализованно с помощью отопительных агрегатов, устанавливаемых в различных местах помещения. При сосредоточенной подаче воздуха применяют крупные отопительные агрегаты, направляющие нагретый воздух в помещения с большой скоростью. Основными преимуществами воздушного отопления являются: возможность совмещения отопления с вентиляцией, отсутствие тепловой инерции, расход металла меньше в 6...8 раз, а капитальные затраты — в 1,5...2 раза. К недостаткам относятся: возможность перемещения вредных выделений вместе с движущимся воздухом, шум при работе вентиляторных установок; большой расход электроэнергии.

К комбинированным системам относят пароводяные, водо-водяные, паровоздушные, водовоздушные, электровоздушные и газовоздушные, т. е. такие, в которых основной теплоноситель (горячая вода или воздух) получается с помощью другого теплоносителя (пара, перегретой воды, электроэнергии, газа). В пароводяных и водо-водяных системах основной теплоноситель подготавливается в водонагревателе — бойлере. Нагретая вода поступает по трубопроводу в отопительные приборы системы отопления здания. Из приборов охлажденная вода возвращается для нагрева обратно в бойлер. Во всех комбинированных системах воздушного отопления воздух нагревается в калориферах.

По способу перемещения теплоносителя системы центрального отопления подразделяют на системы с естественным побуждением, действующие за счет разности давлений столбов охладившейся и горячей воды или охладившегося и нагретого воздуха, и системы с механическим побуждением. В системах водяного отопления движение воды достигается с помощью насоса, а в системах воздушного отопления движение воздуха — с помощью вентилятора.

По способу передачи тепла помещению выделяют следующие группы систем отопления:

- конвекционные (системы отопления с конвекторами или ребристыми трубами);
- лучистые системы, при работе которых средневзвешенная температура поверхностей ограждающих конструкций выше температуры воздуха помещения. Такие условия достигаются развитой, умеренно нагретой теплоотдающей по-

верхностью (потолка, стены, пола) и подвесными нагретыми панелями;

- конвекционно-лучистые (печное отопление и системы с радиаторами или приборы панельного типа).

4.3.3. Нагревательные приборы систем отопления

Нагревательные приборы являются основными элементами системы отопления и должны отвечать определенным теплотехническим, санитарно-гигиеническим и технико-экономическим требованиям. Теплотехнические требования сводятся к тому, чтобы нагревательные приборы хорошо передавали тепло от теплоносителя (воды или пара) отапливаемым помещениям. Температура поверхности приборов ограничивается санитарно-гигиеническими требованиями. В помещениях с длительным пребыванием человека она не должна быть выше 95 °С, так как при более высокой температуре может быть сухая возгонка оседающей на приборе органической пыли, сопровождающаяся выделением вредных веществ, в частности — окиси углерода.

Нагревательные приборы должны быть компактны, с легкодоступной для осмотра и очистки от пыли поверхностью, форма и отделка приборов должны соответствовать назначению помещения. С санитарно-гигиенической точки зрения желательно устанавливать приборы, у которых преобладает передача тепла излучением, так как они создают лучшие микроклиматические условия в помещении. Способ передачи тепла зависит от конструкции прибора и места его установки.

Технико-экономические требования, предъявляемые к приборам, состоят в следующем:

- необходимо, чтобы форма и конструкция прибора соответствовали требованиям технологии их массового производства;
- конструкция прибора должна быть такой, чтобы из отдельных элементов можно было собрать прибор с любой поверхностью нагрева;
- стенки прибора должны быть температуроустойчивыми, паро- и водонепроницаемыми;
- затрата металла и стоимость отопительных приборов, отнесенная к единице полезно передаваемого тепла, должны быть наименьшими.

Нагревательные приборы, применяемые в системах центрального отопления, подразделяются:

- по материалу — на приборы металлические (чугунные и стальные), малометаллические (комбинированные) и неметаллические (керамические, бетонные и др.);
- по внешней поверхности — на гладкие (радиаторы и панели), ребристые (конвекторы, ребристые трубы).

4.3.4. Автоматизация систем отопления

Отопление зданий в зависимости от назначения осуществляется с помощью потока нагретого воздуха, совмещаемого с приточной вентиляцией, либо с помощью горячей воды (пара). Оба метода чаще всего осуществляются централизованно. Воздушное отопление нашло широкое применение в зданиях общественного назначения (торговых центрах, зрелищных, спортивных и т. д.). Водяное — применяется в лечебных учреждениях, жилых, административных и т. п. зданиях и позволяет создавать общую для всего здания и индивидуальную для каждого помещения систему автоматического регулирования температуры.

В первом случае датчики температуры устанавливаются в трех характерных помещениях здания и воздействуют на общий ввод теплосети, изменяя отпуск теплоты.

Во втором случае датчики устанавливают в каждом помещении, осуществляя контроль температуры и регулируя индивидуальную теплоотдачу. Обе системы имеют практическое применение, а их использование зависит от назначения здания.

Из практики известно, что ни нагреть, ни охладить помещение, образованное массивными стенами, быстро нельзя. Требуется обычно продолжительное время для существенного изменения температуры. Это позволяет сделать следующие выводы:

- система автоматического регулирования центральным отоплением инерционна;
- более эффективна система автоматического регулирования, индивидуальная для каждого помещения;
- для реализации индивидуальной системы целесообразно использовать простейшие датчики контроля, имеющие два регулирующих положения: ниже нормы, выше нормы.

Автоматизация центрального отопления получила широкое распространение во всех типах зданий всевозможного отопле-

ния. Применение системы регулирования позволяет не только экономить тепловую энергию, а следовательно, и энергоресурсы, но и создает комфортные условия, способствующие повышению производительности труда и улучшающие условия отдыха.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные требования к системам отопления?
2. Как классифицируются системы отопления по виду теплоносителя?
3. Как происходит движение воды и воздуха в системах водяного и воздушного отопления?
4. На чем основано действие конвекционного, лучистого и конвекционно-лучистого отопления?
5. Какие требования предъявляются к нагревательным приборам?
6. В чем заключается автоматизация систем отопления?

Литература

1. Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учеб. для вузов / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов, А. Г. Схиртладзе и др. ; под ред. Н. М. Капустина. М. : Высш. шк., 2004.
2. *Плановский А. М.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии : учебник для вузов. М. : Химия, 1987.
3. *Воронько В. П., Схиртладзе А. Г., Брюханов В. Н.* Машиностроительное производство : учеб. для сред. спец. учеб. заведений / под ред. Ю. М. Соломенцева. М. : Высш. школа ; Академия, 2001.
4. *Головинский О. И.* Основы автоматики : учеб. для техникумов. М. : Высш. шк., 1987.
5. *Дриц М. Е., Москалев М. А.* Технология конструкционных материалов и материаловедение : учеб. для вузов. М. : Высш. шк., 1990.
6. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учеб. для нач. проф. образования / С. А. Зайцев, Д. Д. Грибанов, А. Н. Толстов, Р. В. Меркулов. М. : Академия, 2005.
7. *Синилов В. Г.* Системы охранной, пожарной и охранно-пожарной сигнализации : учеб. для нач. проф. образования ; учеб. пособие для сред. проф. образования. М. : Академия, 2004.
8. *Соколов Б. А.* Котельные установки и их эксплуатация : учеб. для нач. проф. образования. М. : Академия, 2005.
9. Технология горячей обработки материалов : учеб. пособие для техникумов / под ред. Н. М. Челнокова. М. : Высш. шк., 1972.
10. Технология металлов и конструкционные материалы : учебник для машиностроительных техникумов / Б. А. Кузьмин, Ю. Е. Абраменко, М. А. Кудрявцев и др. ; под общ. ред. Б. А. Кузьмина. М. : Машиностроение, 1989.
11. *Тихомиров К. В.* Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция : учеб. для вузов. М. : Стройиздат, 1981.

Содержание

Предисловие	3
Введение	4
Раздел 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТИПЫ И ВИДЫ ПРОИЗВОДСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ	5
1.1. Основные понятия	5
1.2. Типы и виды производства	6
1.3. Классификация технологий	10
Раздел 2. ТЕХНОЛОГИИ ПО ПРОЦЕССУ ПРОВЕДЕНИЯ	12
2.1. Общие положения	12
2.2. Гидромеханические процессы	14
2.2.1. Общие сведения	14
2.2.2. Перемещение жидкостей и газов	19
2.2.3. Разделение жидких и газовых гетерогенных систем	25
2.2.4. Перемешивание в жидких средах	34
2.3. Тепловые процессы	37
2.3.1. Основные сведения	37
2.3.2. Источники энергии и теплообменная аппаратура	42
2.3.3. Выпаривание растворов	50
2.3.4. Искусственное охлаждение	53

2.4. Массообменные процессы	57
2.4.1. Общие вопросы массопередачи	57
2.4.2. Абсорбция	59
2.4.3. Ректификация и дистилляция	66
2.4.4. Экстракция	72
2.4.5. Адсорбция	79
2.4.6. Сушка	84
2.4.7. Кристаллизация	90
2.4.8. Мембранные процессы	96
2.5. Механические процессы	104
2.5.1. Измельчение твердых тел	104
2.5.2. Классификация твердых материалов	110
2.5.3. Дозирование	117
2.5.4. Смешение	119
2.5.5. Перемещение твердых материалов	120
Раздел 3. ТЕХНОЛОГИИ ПО ВИДАМ ПРОИЗВОДСТВА	125
3.1. Металловедение и металлообработка	125
3.2. Проектирование литых заготовок	126
3.2.1. Общие сведения	126
3.2.2. Литейные сплавы, плавильные агрегаты	130
3.2.3. Подготовка сплавов к разливке в литейные формы	133
3.2.4. Заливка литейных форм	135
3.2.5. Изготовление литых заготовок в разовых формах	137
3.2.6. Изготовление отливок в многократных формах . .	148
3.2.7. Выбивка, очистка и обрубка отливок	161
3.3. Обработка металлов давлением	170
3.3.1. Физические основы обработки металлов давлением	170
3.3.2. Нагрев металла и нагревательные устройства	175
3.3.3. Прокатное производство	177

3.3.4. Волочение и прессование	183
3.3.5. Ковка	185
3.3.6. Горячая объемная штамповка	188
3.3.7. Холодная штамповка	194
3.3.8. Контроль качества изделий, новые направления обработки металлов давлением	199
3.4. Производство деталей из металлических порошков	202
3.4.1. Общие сведения	202
3.4.2. Способы производства металлических порошков	203
3.4.3. Технологический процесс изготовления изделий из металлических порошков	206
3.4.4. Металлокерамические материалы	211
3.5. Пластические массы, технология изготовления изделий из пластмасс	214
3.5.1. Основные сведения. Структура пластмасс	214
3.5.2. Физическое состояние полимеров	217
3.5.3. Основные представители полимеров и пластмасс и их применение в народном хозяйстве	218
3.5.4. Технология изготовления изделий из пластмасс	221
3.6. Основы технологии электроэрозионной обработки	234
3.6.1. Электрофизические методы обработки	234
3.6.2. Электрохимические методы обработки	237
3.6.3. Ультразвуковая обработка и лучевые методы обработки	239
3.7. Основы технологии упрочняющей обработки деталей машин	240
3.7.1. Качество машин	240
3.7.2. Технологические способы упрочняющей обработки пластическим деформированием	241
3.7.3. Технологические способы упрочняющей обработки наплавкой, напылением, нанесением покрытий на рабочие поверхности деталей	244

Раздел 4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	246
4.1. Автоматизация электроснабжения и освещения	246
4.1.1. Автоматизация систем электроснабжения	246
4.1.2. Автоматизация управления освещением	248
4.2. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования	251
4.2.1. Автоматизация систем вентиляции	251
4.2.2. Автоматизация систем кондиционирования воздуха	257
4.3. Автоматизация систем отопления	260
4.3.1. Общие сведения об отоплении	260
4.3.2. Виды систем отопления	261
4.3.3. Нагревательные приборы систем отопления	264
4.3.4. Автоматизация систем отопления	265
Литература	267

Молоканова Надежда Петровна

Типовые технологии производства

Учебное пособие

Редактор *Л. А. Милинская*

Корректор *Л. А. Шитова*

Компьютерная верстка *И. В. Кондратьевой*

Оформление серии *Л. Зарецкой*

Сдано в набор 04.12.2007. Подписано в печать 20.02.2008. Формат 60 × 90^{1/16}.
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 17,0. Уч.-изд. л. 17,5.
Бумага офсетная. Тираж 3000 экз. Заказ № 8907.

Издательство «ФОРУМ»

101000, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а

Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43

E-mail: mail@forum-books.ru

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

Отдел продаж «ИНФРА-М»

127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в

Тел.: (495) 363-42-60

Факс: (495) 363-92-12

E-mail: books@infra-m.ru

Центр комплектования библиотек

119019, Москва, ул. Моховая, д. 16

(Российская государственная библиотека, кор. К)

Тел.: (495) 202-93-15

Магазин «Библиосфера» (розничная продажа)

109147, Москва, ул. Марксистская, д. 9

Тел.: (495) 670-52-18, (495) 670-52-19

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.

Молоканова Надежда Петровна - преподаватель технических специальностей Обнинского политехникума, председатель цикловой комиссии по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Автор методических пособий и практикумов по дисциплинам: «Автоматическое управление», «Автоматика», «Средства измерений» и «Электротехнические измерения».

ISBN 978-5-91134-228-9

