

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебная программа дисциплины

➤ Учебное пособие

Лабораторный практикум

Методические указания по самостоятельной работе

Банк тестовых заданий в системе UniTest



УДК 621.7/.9
ББК 30.3
А91

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Технология конструкционных материалов» подготовлен в рамках инновационной образовательной программы «Материаловедческое образование при подготовке бакалавров, инженеров и магистров по укрупненной группе образовательных направлений и специальностей "Материаловедение, металлургия и машиностроение" в Сибирском федеральном университете», реализованной в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;
Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

Астафьева, Е. А.

А91 Технология конструкционных материалов. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / Е. А. Астафьева, Ф. М. Носков, Г. Ю. Зубрилов. – Электрон. дан. (11 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Технология конструкционных материалов : УМКД № 26-2007 / рук. творч. коллектива Е. А. Астафьева). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 11 Мб свободного дискового пространства ; привод *DVD* ; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит) ; *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

ISBN 978-5-7638-1041-7 (комплекса)

ISBN 978-5-7638-1412-5 (пособия)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802389 от 27.11.2008 г. (комплекса)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Технология конструкционных материалов», включающего учебную программу, лабораторный практикум, методические указания по самостоятельной работе, организационно-методические указания, контрольно-измерительные материалы «Технология конструкционных материалов. Банк тестовых заданий», а также наглядное пособие «Технология конструкционных материалов. Презентационные материалы».

Рассмотрены основы строения конструкционных металлических и неметаллических материалов, приведены методы определения механических свойств материалов, представлена структура технологических процессов современного машиностроительного производства: литья, обработки давлением, резанием, сварки, а также основы сборки машин.

Предназначено для студентов направления подготовки бакалавров 150300.62 «Машиностроение» укрупненной группы 150000 «Материаловедение, металлургия и машиностроение».

© Сибирский федеральный университет, 2008

Рекомендовано Инновационно-методическим управлением СФУ
в качестве учебного пособия

Редактор А. А. Гетьман

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения информационно-аналитического департамента СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 25.09.2008

Объем 11 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
-----------------------	-----------

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ	12
---	-----------

1.1. Технологические возможности основных методов получения заготовок	12
1.2. Термины и определения	15
1.3. Основные виды, качество и технологичность заготовок	17

Глава 2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ, ИХ СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ	20
---	-----------

2.1. Атомно-кристаллическая структура металлов	20
2.2. Кристаллографические направления и плоскости	22
2.3. Дефекты кристаллической решетки металлов	24
2.4. Свойства материалов	28
2.5. Классификация металлических материалов.....	40
2.5.1. Сплавы на основе железа	40
2.5.2. Классификация сталей	43
2.5.3. Чугуны	57
2.5.4. Инструментальные материалы	63
2.5.5. Цветные металлы и их сплавы	65
2.6. Классификация неметаллических материалов	67
2.6.1. Строение и виды полимеров.....	67
2.6.2. Строение стекла.....	70
2.6.3. Строение керамики	71

Глава 3. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	73
---	-----------

3.1. Основные направления металлургического производства	73
3.2. Получение чугуна.....	73
3.3. Производство стали.....	76
3.3.1. Сущность процесса.....	76

3.3.2. Производство стали в кислородных конвертерах.....	76
3.3.3. Производство стали в электродуговых печах	79
3.3.4. Разливка стали.....	82
3.3.5. Способы повышения качества стали	85
3.3.6. Прямое восстановление железа.....	87
3.4. Производство цветных металлов	89
3.4.1. Производство алюминия	89
3.4.2. Производство меди.....	90
3.4.3. Производство магния.....	91
3.4.4. Производство титана	92

**Глава 4. СПОСОБЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК
ДЕТАЛЕЙ МАШИН 94**

4.1. Формообразующие технологические процессы	94
4.2. Изделия и покрытия, получаемые из материалов в парогазовой фазе ...	95
4.3. Получение заготовок из жидкой фазы методами литья и сварки плавлением	98
4.4. Получение заготовок пластическим деформированием	99
4.5. Факторы, определяющие выбор метода получения заготовки.....	101

**Глава 5. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО – СПОСОБ
ПЕРВИЧНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ
ЖИДКОПОДВИЖНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
..... 105**

5.1. Кристаллизация металлов	105
5.1.1. Физическая сущность процесса.....	105
5.1.2. Кристаллизация сплавов	109
5.1.3. Форма кристаллов и строение слитков	111
5.2. Сущность и значение технологического процесса формообразования методами литья.....	115
5.2.1. Классификация литых заготовок	116
5.2.2. Требования к литейным сплавам	117
5.2.3. Литейные свойства сплавов.....	117
5.3. Способы изготовления отливок.....	118
5.3.1. Изготовление отливок в песчаных формах	119

5.3.2. Приготовление формовочных и стержневых смесей и их свойства	121
5.3.3. Модельный комплект	123
5.3.4. Изготовление литейных форм	125
5.3.5. Специальные виды литья	130
5.4. Особенности изготовления отливок из различных сплавов.....	138
5.5. Технологичность конструкций литых форм	140
5.5.1. Основы конструирования литых заготовок.....	140
5.5.2. Конфигурация отливок, получаемых литьем в песчаные формы	142
5.5.3. Выбор способа литья.....	144

Глава 6. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗАГОТОВОК В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ 145

6.1. Виды обработки металлов давлением	145
6.2. Влияние обработки металлов давлением	146
на структуру и свойства металлов.....	146
6.2.1. Механизм пластического деформирования	146
6.2.2. Особенности деформирования моно- и поликристаллов	149
6.2.3. Свойства холоднодеформированных металлов	152
Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла	153
6.2.5. Горячая деформация.....	154
6.3. Влияние схемы напряженного состояния на пластичность	157
6.4. Основные типы нагревательных устройств.....	158
6.5. Методы получения машиностроительных профилей	161
6.5.1. Прокатное производство	161
6.5.2. Получение профилей методами прессования и волочения	171
6.6. Методы получения поковок деталей машин	175
6.6.1. Ковка металла	175
6.6.2. Горячая объемная штамповка	187
6.7. Холодная листовая штамповка.....	200
6.7.1. Общая характеристика процессов получения изделий из листовых заготовок	200
6.7.2. Основные технологические операции листовой штамповки.....	201

6.7.3. Конструирование технологичных изделий, изготавливаемых листовой штамповкой.....	205
--	-----

Глава 7. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ ЗАГОТОВОК 207

7.1. Технологические особенности получения сварных соединений из основных конструкционных материалов.....	211
7.2. Сварка плавлением и резка металлов.....	213
7.2.1. Электродуговая сварка.....	213
7.2.2. Источники сварочного тока.....	215
7.2.3. Электроды для ручной электродуговой сварки.....	221
7.2.4. Автоматическая дуговая сварка.....	222
7.2.5. Плазменная сварка.....	224
7.2.6. Электрошлаковая сварка.....	225
7.2.7. Лучевые способы сварки.....	226
7.2.8. Газовая сварка.....	228
7.2.9. Резка металлов и сплавов.....	231
7.3. Сварка давлением.....	234
7.3.1. Контактная сварка.....	234
7.3.2. Диффузионная сварка.....	240
7.3.3. Сварка трением.....	241
7.3.4. Общие принципы конструирования сварных заготовок.....	242
7.3.5. Напряжения и деформации при сварке.....	242
7.3.6. Дефекты в сварных соединениях. Методы контроля качества.....	246
7.4. Пайка.....	249

Глава 8. КОМБИНИРОВАННЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК 251

Глава 9. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 255

9.1. Порошковая металлургия.....	255
9.1.1. Методы получения порошков.....	256
9.1.2. Формообразование заготовок.....	259

9.1.3. Спекание	263
9.1.4. Изделия из порошковых композиционных материалов.....	265
9.1.5. Проектирование технологичных заготовок.....	266
9.2. Способы формования изделий из пластмасс	267
9.3. Композиционные материалы. Классификация	275

**Глава 10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ..... 280**

10.1. Обработка заготовок на металлорежущих станках.....	280
10.1.1. Основы теории резания.....	280
10.1.2. Элементы процесса резания и геометрия срезаемого слоя.....	280
10.1.3. Элементы и части токарного прямого проходного резца	283
10.1.4. Геометрия инструмента и ее влияние на процесс резания и качество обработки.....	284
10.1.5. Физические основы процесса резания металлов	286
10.1.6. Силы резания	288
10.1.7. Износ и стойкость режущего инструмента.....	290
10.1.8. Смазывающе-охлаждающие технологические среды.....	292
10.1.9. Точность обработки и качество обработанной поверхности	293
10.1.10. Производительность обработки	294
10.2. Общие сведения о металлорежущих станках	295
10.2.1. Классификация металлорежущих станков	295
10.2.2. Кинематика станков	297
10.2.3. Кинематические схемы металлорежущих станков	300
10.3. Обработка заготовок на станках токарной группы	302
10.3.1. Характеристика методов точения.....	304
10.3.2. Токарные резцы	304
10.3.3. Рабочие приспособления для токарной обработки	305
10.3.4. Станки токарной группы и примеры обработки заготовок.....	307
10.3.5. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на станках токарной группы	315
10.4. Обработка заготовок на сверлильных станках	316

10.4.1. Схемы обработки поверхностей на станках сверлильной группы	317
10.4.2. Особенности процесса сверления	328
10.4.3. Режимы резания при сверлении.....	328
10.4.4. Станки сверлильной группы.....	328
10.4.5. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на сверлильных станках	330
10.5. Обработка заготовок на расточных станках	330
10.5.1. Особенности обработки заготовок на расточных станках.....	331
10.5.2. Режущий инструмент	333
10.5.3. Технологическая оснастка, применяемая при растачивании	334
10.5.4. Расточные станки.....	335
10.5.5. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на расточных станках	338
10.6. Обработка заготовок на протяжных станках.....	339
10.6.1. Элементы и геометрия режущей части протяжек.....	339
10.6.2. Особенности процесса протягивания	343
10.6.3. Протяжные станки.....	345
10.6.4. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на протяжных станках	347
10.7. Обработка заготовок на фрезерных станках	349
10.7.1. Схемы обработки поверхностей на станках фрезерной группы.....	349
10.7.2. Схемы фрезерования	351
10.7.3. Особенности процесса и режимы резания при фрезеровании	353
10.7.4. Силы резания	354
10.7.5. Элементы и геометрия фрез	355
10.7.6. Типы фрез.....	357
10.7.7. Станки фрезерной группы	360
10.7.8. Технологические требования к деталям,	366
10.8. Обработка заготовок на строгальных и долбежных станках	367
10.8.1. Характеристика методов строгания и долбления	367
10.8.2. Строгальные и долбежные резцы и рабочие приспособления	369
10.8.3. Строгальные и долбежные станки	370
10.8.4. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на строгальных и долбежных станках	372

10.9. Резьбо- и зубонарезание	374
10.9.1. Резьбонарезание	374
10.9.2. Зубонарезание	376
10.9.3. Технологические требования к конструкции зубчатых колес.....	382
10.10. Обработка заготовок шлифованием	383
10.10.1. Особенности процесса резания при шлифовании.....	383
10.10.2. Износ, стойкость и правка кругов.....	383
10.10.3. Испытания и балансировка кругов. Правила техники безопасности.....	384
10.10.4. Абразивный инструмент	385
10.10.5. Станки шлифовальной группы.....	390
10.10.6. Технологические требования к деталям, обрабатываемым шлифованием	392
10.11. Отделочные операции	393
Глава 11. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК	401
11.1. Электрофизические методы обработки поверхностей заготовок.....	401
11.2. Электрохимическая обработка	406
Глава 12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ	418
12.1. Наплавка и газотермическое нанесение покрытий.....	418
12.2. Виды химико-термической обработки	421
12.2.1. Цементация стали.....	421
12.2.2. Азотирование стали.....	422
12.2.3. Методы совместного насыщения азотом и углеродом.....	423
12.2.4. Насыщение металлами	423
Глава 13. ОСНОВЫ СБОРОЧНЫХ РАБОТ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА....	425
13.1. Машина и ее служебное назначение	425
13.2. Технологичность сборочных единиц	427

13.3. Разработка последовательности сборки..... 433

13.4. Автоматизированное проектирование технологии сборочно-монтажных работ..... 437

13.5. Технологическая подготовка производства серийных изделий 438

**Глава 14. ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА И
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ 442**

14.1. Проблемы машиностроительного производства и методы их решения
..... 442

14.2. Направления природосбережения при проектировании
машиностроительных производств 449

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... 453

ВВЕДЕНИЕ

Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования подготовка бакалавров машиностроительного направления предусматривает изучение общепрофессиональной дисциплины «Технология конструкционных материалов».

Цель изучения дисциплины – ознакомление со структурой современного машиностроительного производства и содержанием его технологических процессов.

Основная задача изучения дисциплины – освоение методов создания изделий из современных материалов на современном оборудовании.

Важным этапом при создании изделия машиностроения является процесс проектирования. Будущие бакалавры техники и технологии должны принимать конструкторско-технологические решения, соответствующие эксплуатационным требованиям к изделиям и современному уровню развития технологии.

В предлагаемом учебном пособии представлены сведения о составе, свойствах конструкционных материалов и основных методах их получения. В пособии рассмотрены технологии заготовительного производства и методы изготовления деталей машин, вопросы автоматизированного проектирования при серийном производстве заготовок и сборке машин, а также проблемы экологии машиностроительных производств.

По окончании изучения курса «Технология конструкционных материалов» студенты должны обладать определенными компетенциями, а именно готовностью:

использовать знания по естественнонаучным и общетехническим дисциплинам в профессиональной деятельности;

работать со справочной и специальной литературой, а также другими видами информации для решения производственных задач;

уметь проводить расчеты по типовым методикам и проектировать технологические процессы изготовления заготовок и деталей машин простой конфигурации;

участвовать в разработке проектной и рабочей технической документации в соответствии с нормативными документами;

контролировать соблюдение технологической дисциплины в условиях производства.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Дисциплина «Технология конструкционных материалов» изучает основы не только машиностроительного, но и металлургического производства. На [рис. 1.1](#) представлены основные этапы изготовления изделий машиностроения.

1.1. Технологические возможности основных методов получения заготовок

Технологический процесс начинается с металлургического производства первичных заготовок: слитков, профилей, порошков, потому что основные конструкционные материалы сегодня – это металлические сплавы.

В условиях металлургического производства машиностроительные профили изготавливают обработкой давлением: прокаткой, прессованием и волочением. В результате получают заготовки в виде сортовых профилей, листового проката, труб и периодических профилей. При изготовлении деталей из калиброванных профилей, отличающихся высокой точностью размеров и низкой шероховатостью поверхности, возможна только отделочная механическая обработка поверхностей заготовок.

Сортовые профили подразделяют на профили простой геометрической формы (квадрат, круг, шестигранник, прямоугольник) и фасонные (швеллер; рельс; угловой, тавровый профили и т. п.), листовой металл – на толсто- и тонколистовую сталь и фольгу. Трубы могут быть бесшовными и сварными. Бесшовные трубы используют в наиболее ответственных трубопроводах, работающих под внутренним давлением в агрессивных средах. Периодические профили имеют изменяющуюся форму и площадь поперечного сечения вдоль своей оси. Они являются заготовками, упрощающими процесс изготовления ответственных деталей машин в условиях крупносерийного производства. Гнутые профили применяют при изготовлении изделий для машиностроения, автомобильной и авиационной промышленности, строительных конструкций.

Заготовки машиностроительного производства, имеющие форму и размеры близкие к форме деталей машин, получают методами обработки давлением, порошковой металлургии, литья и сварки.

Для получения заготовок из стали и цветных металлов с деформированной макроструктурой применяют методы обработки давлением: ковку, объемную и листовую штамповку.

Ковку применяют для изготовления заготовок в единичном производстве путем пластической деформации профилей или слитков. При производ-

стве крупных и уникальных заготовок массой до 250 т ковка – единственно возможный способ обработки давлением.

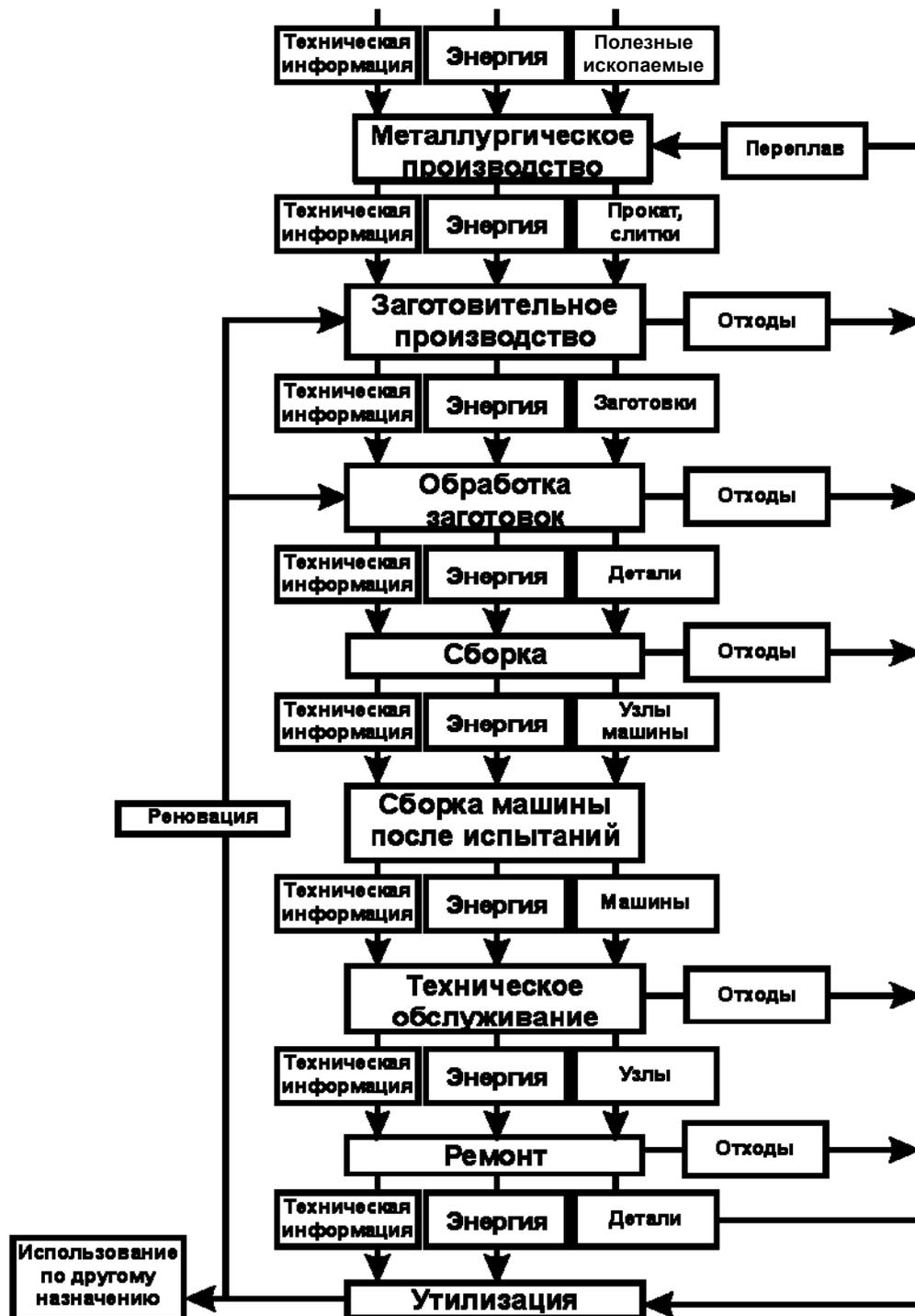


Рис. 1.1. Основные этапы изготовления и обслуживания изделий машиностроительного производства

Заготовки, полученные объемной штамповкой, отличаются более высокой точностью размеров и качеством поверхностного слоя по сравнению с коваными поковками. Применение этого вида обработки давлением для получения заготовок деталей машин экономически целесообразно в условиях

крупносерийного и массового производства. При изготовлении поковок объемной штамповкой применяют сортовые и периодические профили массой до 400 кг. По точности и шероховатости поверхностей заготовки, получаемые холодной объемной штамповкой, не уступают изделиям, изготавливаемым специальными способами литья. При этом механические свойства поковок выше, чем отливок.

Листовой штамповкой изготавливают самые разнообразные плоские и пространственные изделия минимальной массой (от долей граммов до десятков килограммов) с высокой точностью размеров и качеством поверхности. Это позволяет сократить количество отделочных операций механической обработки резанием. В качестве заготовок при листовой штамповке используют полученные прокаткой листы, полосы или ленты, толщина которых обычно не превышает 10 мм.

Методами порошковой металлургии получают заготовки, которые по размерам и форме близки к размерам и форме деталей, поэтому при изготовлении изделий требуется небольшой объем механической обработки. Технологии порошковой металлургии позволяют практически полностью исключить из производства обычные металлургические процессы, а также значительно улучшить экологические показатели производства. Коэффициент использования металла увеличивается до 0,98, производительность труда возрастает по сравнению с изготовлением деталей из сортовых профилей, получаемых в условиях металлургического производства.

Методом литья получают заготовки практически любых размеров, как простой, так и очень сложной конфигурации. При этом отливки могут иметь сложные внутренние полости с криволинейными поверхностями, пересекающимися под различными углами. Точность размеров и качество поверхности заготовки зависят от способа литья. Отливки можно изготавливать практически из всех металлов и сплавов.

Сварные заготовки изготавливают различными видами сварки. В ряде случаев сварка упрощает изготовление заготовок сложной конфигурации. Слабым местом сварной заготовки является шов или околошовная зона: их прочность, как правило, ниже прочности основного металла. Заготовки сложной конфигурации экономически эффективнее изготавливать из элементов, полученных штамповкой, литьем, прокаткой, с их последующим соединением сваркой.

Далее заготовки подвергают механической, электрофизической, электрохимической обработке с целью получения деталей с требуемыми параметрами качества. Так, например, часто сварные конструкции перед резанием подвергают термической обработке для снятия внутренних напряжений и изменения механических свойств.

Затем следует сборка деталей для изготовления машин с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Работоспособность изделия (машины) в целом и качество отдельных деталей проверяют в процессе его испытаний. Если изделие отвечает требованиям технического задания, то его начинают эксплуатировать в заданных условиях.

В процессе технического обслуживания или ремонта выявляются детали, которые не могут эксплуатироваться далее (вышедшие из строя) и должны быть заменены на новые. Отработанные детали диагностируют, и, в зависимости от результатов экспертизы, они могут быть восстановлены или использованы по иному назначению. В случаях, когда изделие неремонтопригодно, его отправляют на переплав или подвергают захоронению в соответствии со специальной технологией.

На всех этапах технологического процесса изготовления изделия происходит потребление энергии и загрязнение окружающей среды. Восстановление физически изношенных деталей, ремонтируемых изделий и использование их вновь позволит существенно сократить затраты на их изготовление и уменьшить потребление ресурсов биосферы и загрязнение окружающей среды.

При проектировании изделий и подготовке технической документации по их изготовлению конструктор и технолог должны обеспечить требуемое качество продукции при минимальных затратах материалов, энергии и труда. Поэтому при конструировании изделий следует учитывать не только условия эксплуатации изделий, но и технологию их изготовления.

В процессе конструирования деталей с заданными показателями качества необходимо учитывать следующие требования, способствующие повышению их технологичности: минимальную себестоимость, трудоемкость и материалоемкость, высокую надежность, стабильность и ремонтпригодность. Вопросы технологичности конструкции детали должны решаться на стадиях проектирования заготовки, ее механической обработки и сборки всего изделия.

При разработке новых технологий необходимо решать экологические вопросы, возникающие при добыче полезных ископаемых, потреблении энергии и загрязнении окружающей среды. Поэтому ответственность за состояние экосистемы Земли лежит на специалистах, работающих во всех областях техники.

1.2. Термины и определения

Изделие – это предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на данном предприятии. Всякое изделие, рассматриваемое как объект проектирования, производства, эксплуатации и ремонта, должно быть рациональным по своему конструктивному исполнению. Состав и структура изделий, в соответствии с которыми разрабатывают конструкторскую документацию, являются основными признаками их деления на виды. В зависимости от наличия или отсутствия составных частей, изделия могут быть отнесены к сборочным единицам или деталям.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой сборочными операциями.

Деталь – изделие, изготовленное из материала одной марки без применения сборочных операций или с использованием местных соединительных операций (сварка, пайка, склеивание и т. п.). Следует различать взаимосвязанные и самостоятельные детали: взаимосвязанными считают детали, являющиеся составными частями сборочных единиц; самостоятельные детали не входят в состав других изделий (например, гаечный ключ).

Машина – устройство, выполняющее преобразования энергии, материалов, информации с целью облегчения и увеличения производительности труда человека. Машины используются для расширения функциональных возможностей человека в различных областях деятельности. Машина состоит из деталей, узлов, сборочных единиц, агрегатов и элементов, обеспечивающих соединение составных частей в многофункциональное изделие.

Узел – часть машины, установки и т. п., состоящая из нескольких простых деталей, имеющих общее функциональное назначение (подшипник качения, редуктор).

Агрегат – укрупненный унифицированный элемент машины, обладающий полной взаимозаменяемостью и выполняющий определенные функции (в автомобиле это двигатель, коробка передач).

Изделия изготавливают в условиях массового, серийного и единичного производства.

Массовое производство характеризуется непрерывным изготовлением изделий ограниченной номенклатуры на узкоспециализированных рабочих местах. Этот тип производства позволяет механизировать и автоматизировать технологический процесс.

Разделение *серийного производства* на крупно-, средне- и мелкосерийное условно. При одном и том же количестве выпускаемых изделий в серии, но при существенном различии их размеров, сложности и трудоемкости производство может быть отнесено к разным типам. По уровню механизации и автоматизации крупносерийное производство схоже с массовым, а мелкосерийное – с единичным.

Единичное производство характеризуется изготовлением в единичных количествах изделий широкой номенклатуры, не повторяющихся или повторяющихся через определенный промежуток времени, на рабочих местах, не имеющих определенной специализации.

Производственный процесс – совокупность всех действий людей и орудий, необходимых на данном производстве для изготовления или ремонта выпускаемых изделий. При осуществлении этого процесса материалы и полуфабрикаты превращаются в готовую продукцию, соответствующую своему служебному назначению.

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению состояния предметов труда. При осуществлении технологического процесса происходит последовательное изменение формы, размеров, свойств материала или полуфабри-

ката в целях получения изделия, соответствующего заданным техническим требованиям. Технологический процесс осуществляется на рабочих местах.

Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте и охватывающая все последовательные действия рабочего и оборудования по изготовлению заготовки или ее обработке.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах.

Производство изделий невозможно без технологического оборудования и оснастки.

Технологическое оборудование – это орудия производства, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещают заготовки, средства воздействия на них и источники энергии. Примером технологического оборудования являются литейные машины, прессы, станки, печи и т. д.

Технологическая оснастка – это орудия производства, используемые совместно с технологическим оборудованием, для выполнения определенной части технологического процесса. Примерами технологической оснастки являются штампы, литейные формы, приспособления, режущий инструмент и т. д.

1.3. Основные виды, качество и технологичность заготовок

Изготовление деталей начинается с производства заготовок. Различают следующие виды заготовок.

Профили – заготовки постоянного или периодического сечения, изготавливаемые в условиях металлургического производства.

Штучные заготовки – заготовки, получаемые обработкой давлением, методами порошковой металлургии, литьем и сваркой.

Комбинированные заготовки – сложные изделия, получаемые соединением (в частности, сваркой) отдельных литых, штампованных, кованных элементов. Эти заготовки классифицируют в соответствии с методом получения исходных элементов и называют *литосварными*, *штампованными*, *литосварными* и др. Примерами комбинированных заготовок также являются заготовки из композиционных материалов. Комбинированные заготовки позволяют снизить массу изделий, а для более нагруженных конструкций использовать оптимальную композицию структурообразующих элементов.

Заготовки характеризуются конфигурацией и размерами, точностью получаемых размеров, структурой металла, состоянием поверхности и т. д. Форма и размеры заготовки определяют технологию ее изготовления и последующую механическую обработку. Точность размеров является важнейшим фактором, влияющим на стоимость изготовления детали.

Припуск на механическую обработку – слой металла, удаляемый с поверхности заготовки с целью получения требуемых по чертежу формы и

размеров детали. Припуск на механическую обработку назначают только на те поверхности, для которых требуемая форма и точность размеров не могут быть достигнуты принятым методом и способом получения заготовки. Размер припуска влияет на себестоимость изготовления детали.

Оптимальный припуск зависит от материала, размеров, конфигурации и вида заготовки, толщины дефектного поверхностного слоя и др. Известно, что полученные в песчаных формах отливки имеют на поверхности раковины, песчаные включения, а поковки, изготовленные ковкой, покрыты окалиной. В процессе проектирования заготовки припуск выбирают по стандартам и справочникам.

Напуск – это объем металла на поверхности заготовки (сверх припуска), предназначенный для упрощения конфигурации заготовки и облегчения условий ее получения. В большинстве случаев напуск удаляют механической обработкой резанием, резе – оставляют в изделии (штамповочные и литейные уклоны, увеличенные радиусы закруглений и др.).

На [рис. 1.2](#) показаны припуски, напуски и операционные размеры вала.

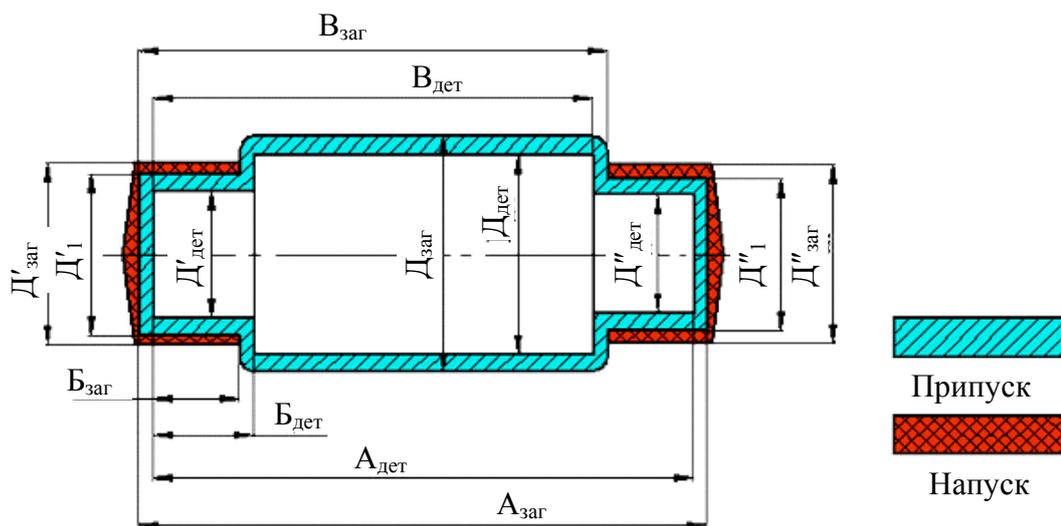


Рис. 1.2. Припуски, напуски на размеры вала: $A_{заг}$, $B_{заг}$, $V_{заг}$, $D'_{заг}$, $D''_{заг}$ – исходные размеры заготовки; $A_{дет}$, $B_{дет}$, $D'_{дет}$, $D''_{дет}$ – размеры детали; D_1 , D_2 , D'_1 , D''_1 – операционные размеры заготовки

Правильный выбор конструкционного материала должен обеспечивать высокие эксплуатационные свойства детали, ее долговечность, ремонтпригодность и способность к утилизации.

Выбор материала осуществляют на основе расчетов, экспериментов или опыта эксплуатации аналогичных деталей. Проектируя деталь, конструктор должен знать, какие технологические процессы будут использованы при изготовлении заготовки и ее последующей обработке. При этом технологические свойства материала могут заранее определять технологию изготовления заготовки и последующую ее термическую и механическую обработку.

Под *качеством промышленной продукции* понимают степень соответствия присущих характеристик запросам потребителей (в соответствии с ГОСТами).

Качество заготовок в большинстве случаев оценивают точностью формы, размеров, взаимного расположения поверхностей, а также физико-механическими свойствами и качеством поверхностного слоя.

Под *точностью заготовки* понимают ее соответствие требованиям чертежа и технических условий на ее изготовление. Отклонение реальной заготовки от требования чертежа (эталона) называют *погрешностью*.

Точность заготовок характеризуют как геометрическими показателями, так и физико-механическими свойствами, которые обеспечиваются правильным выбором марки материала и стабильностью параметров технологического процесса изготовления заготовок.

Качество поверхности определяется свойствами материала и технологией изготовления заготовки. Геометрические показатели качества поверхности и точности заготовок взаимосвязаны. Так, если заготовку получают литьем в песчаных формах, то микро- и макронеровности не позволяют получать высокую точность размеров.

Под *технологичностью конструкции изделия* понимают совокупность свойств конструкции, определяющих ее пригодность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работы. Вопросы технологичности решают комплексно, начиная со стадии проектирования заготовки, выбора метода ее изготовления и заканчивая процессами ее механической обработки и сборки всего изделия.

Для заготовок в качестве показателей технологичности применяют коэффициент использования материала, технологическую себестоимость, трудоемкость изготовления и др.

Коэффициент использования материала (КИМ) – это безразмерная величина, определяемая отношением массы детали ($m_{\text{дет}}$) к массе израсходованного при ее изготовлении материала (m_p):

$$\text{КИМ} = m_{\text{дет}} / m_p.$$

Обеспечение технологичности деталей на стадии проектирования достигается при соблюдении следующих условий:

- конфигурация изделия представляет собой сочетание наиболее простых геометрических форм;
- формы и размеры отдельных элементов детали (уклоны, радиусы закругления и др.) должны быть по возможности унифицированы;
- точность размеров и шероховатость поверхности деталей должны быть обоснованными;
- желательно использовать способы получения заготовок, которые не требуют последующего снятия стружки, например холодную объемную штамповку.

ГЛАВА 2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ, ИХ СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ

2.1. Атомно-кристаллическая структура металлов

Под *атомно-кристаллической структурой* понимают взаимное расположение атомов (ионов), существующее в реальном кристалле.

В твердом состоянии металл представляет собой кристаллический остов, состоящий из положительно заряженных ионов, омываемых «газом» из свободных коллективизированных электронов. Связь в металле осуществляется электростатическими силами. Между ионами и коллективизированными электронами проводимости возникают электростатические силы притяжения, которые стягивают ионы. Такая связь называется *металлической*.

Силы связи в металлах определяются силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами. Атомы (ионы) располагаются на таком расстоянии один от другого, при котором энергия взаимодействия минимальна.

Атомы в металле располагаются закономерно, образуя правильную кристаллическую решетку, что соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов.

Кристаллическая решетка, представленная на [рис. 2.1, а](#), состоит из воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки расположения атомов (ионов) в пространстве. Жирными линиями выделен наименьший параллелепипед, последовательным перемещением которого вдоль трех своих осей может быть построен весь кристалл. Этот наименьший объем кристалла ([рис. 2.1, а, б](#)), дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме, получил название *элементарной кристаллической ячейки*. Для однозначной ее характеристики необходимо знать следующие величины: три ребра (a , b и c) и три угла между осями α , β и γ ([рис. 2.1, в](#)).

Большинство металлов образуют одну из следующих высокосимметричных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно-центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную ([рис. 2.2](#)).

Как видно из [рис. 2.2, а](#), в кубической объемно-центрированной решетке (ОЦК) атомы расположены в вершинах куба и один атом в центре куба. Кубическую объемно-центрированную решетку имеют металлы Pb, K, Na, Li, Ti_β, Zr_β, Ta, W, V, Fe_α, Cr, Nb, Ba и др.

В кубической гранецентрированной решетке (ГЦК) атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани ([рис. 2.2, б](#)). Решетку такого типа имеют металлы Ca_α, Ce, Sr_α, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Jr, Fe_γ, Cu, Co_α и др.

В гексагональной решетке (ГПУ) ([рис. 2.2, в](#)) атомы расположены в вершинах и в центре шестигранных оснований призмы, а три атома – в средней плоскости призмы. Такую упаковку атомов имеют металлы Mg, Ti_α, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Co_β, Be, Ca_β и др.

2.1. Атомно-кристаллическая структура металлов

Расстояния a , b , c между центрами ближайших атомов в элементарной ячейке (рис. 2.1, в) называются *периодами решетки*, выражаются в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ см}$) и для большинства металлов находятся в пределах $0,1\text{--}0,7 \text{ нм}$.

На элементарную ячейку объемно-центрированной решетки приходятся два атома. Один из них в центре куба, а другой вносят атомы, располагающиеся в вершинах куба. При этом каждый атом в вершине куба одновременно принадлежит восьми сопряженным элементарным ячейкам и на каждую ячейку приходится лишь $1/8$ массы этого атома, т. е. на всю ячейку приходится $1/8 \times 8 = 1$ атом.

На элементарную ячейку гранецентрированной кубической решетки приходятся четыре атома. Из них один (по такому же расчету, как и для объемно-центрированной решетки) вносят атомы в вершинах куба, а три суммарно ($(1/2) \times 6 = 3$) вносят атомы, находящиеся на середине грани, так как каждый из таких атомов принадлежит двум ячейкам.

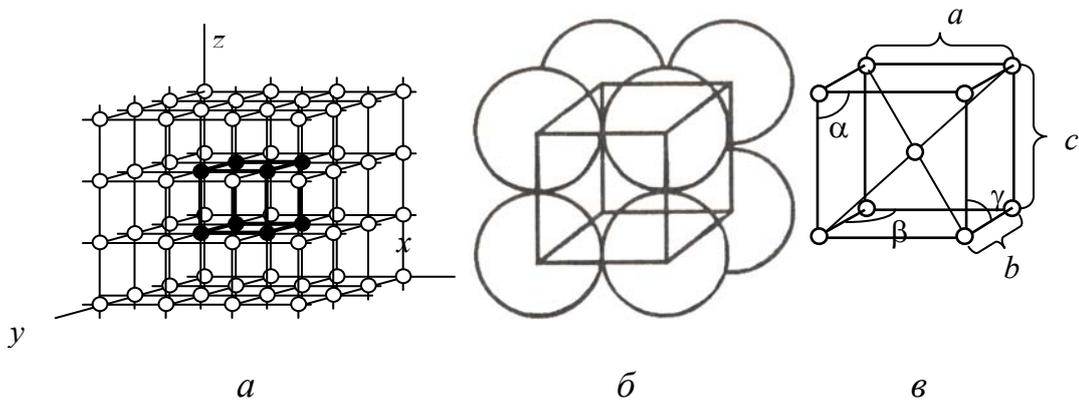


Рис. 2.1. Расположение атомов (ионов): a – в кристаллической решетке; b , c – в элементарной кристаллической ячейке

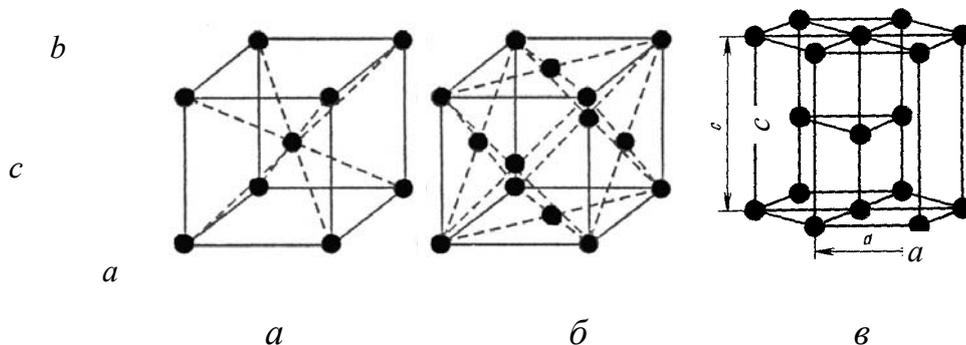


Рис. 2.2. Кристаллические решетки металлов: a – объемно-центрированная кубическая (ОЦК); b – гранецентрированная кубическая (ГЦК); c – гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

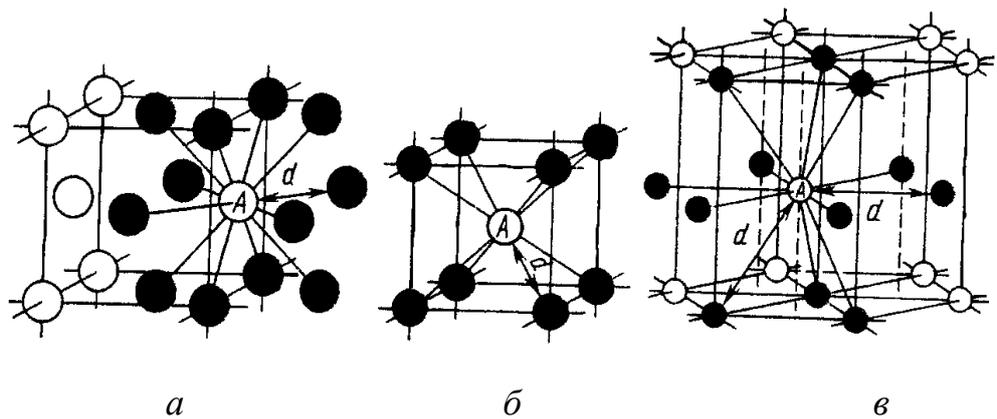


Рис. 2.3. Число атомов, находящихся на наименьшем расстоянии от данного атома A в разных кристаллических решетках: a – ГЦК; b – ОЦК; v – ГПУ

На элементарную ячейку гексагональной плотноупакованной решетки приходится шесть атомов ($3 + (1/6) \times 12 + (1/2) \times 6 = 6$).

Период и число частиц, приходящихся на элементарную ячейку, определяют расположение частиц в кристалле. Дополнительными характеристиками кристаллической решетки являются координационное число и коэффициент компактности.

Координационное число (K) – количество атомов, находящихся на наименьшем расстоянии от данного атома в разных кристаллических решетках. В решетке объемно-центрированного куба (ОЦК) для каждого атома число таких соседей будет 8 (K_8), для решеток гранецентрированной кубической (ГЦК) и гексагональной плотноупакованной (ГПУ) – 12 (K_{12}) (рис. 2.3).

Отношение объема всех частиц, приходящихся на одну элементарную ячейку, ко всему объему элементарной ячейки определяет коэффициент компактности. Например, его значение для ОЦК – 0,68, для ГЦК – 0,74.

Оставшееся пространство занимают поры.

2.2. Кристаллографические направления и плоскости

Упорядоченность расположения атомов в кристаллической решетке позволяет четко выделить отдельные кристаллографические направления и плоскости.

Кристаллографическими направлениями являются прямые или лучи, выходящие из какой-нибудь точки отсчета, вдоль которых на определенном расстоянии друг от друга располагаются атомы. Точками отсчета могут служить, например, вершины куба, при этом кристаллографическими направлениями являются его ребра и диагонали граней (рис. 2.4, а).

Кристаллографическими плоскостями являются плоскости, на которых лежат атомы, например грани куба или его диагональные плоскости (рис. 2.4, б–г).

Кристаллографические направления и плоскости принято обозначать индексами Миллера. Для определения индекса какого-либо направления

2.2. Кристаллографические направления и плоскости

следует найти координаты ближайшего к точке отсчета атома, лежащего на этом направлении, выраженные через параметр решетки. Например, координаты ближайшего атома вдоль оси Ox выражают через 100, этими цифрами принято обозначать индекс направления вдоль оси Ox и параллельных ему направлений: $[100]$. Индексы направлений вдоль осей Oy и Oz и параллельных им направлений выражают соответственно через $[010]$ и $[001]$, а направления вдоль диагоналей граней xOz , xOy , yOz и диагонали куба получают индексы соответственно $[101]$, $[110]$, $[011]$, $[111]$ (рис. 2.4, а).

Для определения индекса кристаллографической плоскости следует вначале найти координаты ближайших точек ее пересечения с осями координат, проведенными из точки отсчета O . Затем обратные величины найденных координат нужно записать в обычной последовательности в круглых скобках. Например, координаты точек пересечения с осями координат интересующей нас ближайшей плоскости, параллельной плоскости xOy (т. е. плоскости верхней грани куба на рис. 2.4, б), являются числа $\infty, \infty, 1$, поэтому индекс можно записать так: (001) . Индексы плоскостей, параллельных плоскостям xOz и yOz , будут соответственно (010) и (100) (рис. 2.4, б), индекс вертикальной диагональной плоскости куба (рис. 2.4, в) – (110) , а индекс наклонной плоскости, пересекающейся со всеми тремя осями координат на удалении одного параметра, примет вид (111) (рис. 2.4, г).

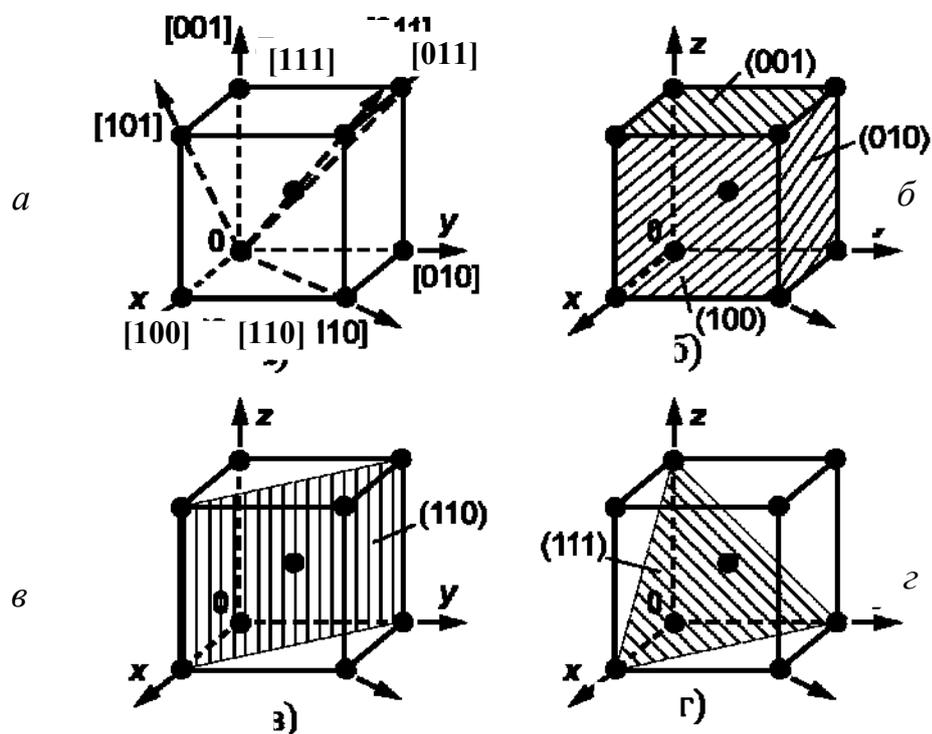


Рис. 2.4. Основные кристаллографические направления (а) и плоскости (б–г)

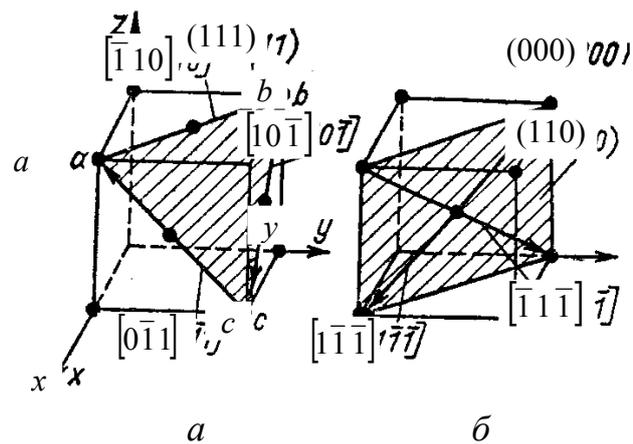


Рис. 2.5. Обозначение кристаллографических плоскостей куба и различных кристаллографических направлений: *a* – в ГЦК-решетке; *б* – в ОЦК-решетке

Использование понятий о кристаллографических направлениях и плоскостях и индексах Миллера позволяет описывать различные явления, происходящие в кристаллографических телах, а также особенности свойств кристаллографических тел вдоль различных направлений и плоскостей. Так, плоскости (100) в ОЦК-решетке на [рис. 2.4, б](#) принадлежит лишь один атомом ($(1/4) \times 4$), плоскости ромбического додекаэдра (110) на [рис. 2.4, в](#) и [рис. 2.5, б](#) – два атома: один атом вносят атомы, находящиеся в вершинах $[(1/4) \times 4]$, и один атом в центре куба. В ГЦК-решетке плоскостью с наиболее плотным расположением атомов будет плоскость октаэдра (111) ([рис. 2.5, а](#)), а в ОЦК-решетке – плоскость (110) ([рис. 2.5, б](#)).

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки свойства (химические, физические, механические) каждого монокристалла зависят от направления вырезки образца по отношению к направлениям в решетке. Подобная неодинаковость свойств монокристалла в различных кристаллографических направлениях называется *анизотропией*.

Кристалл – тело анизотропное в отличие от аморфных тел (стекло, пластмассы и др.), характеризующихся неупорядоченным расположением атомов и молекул.

2.3. Дефекты кристаллической решетки металлов

Строение любого реального кристалла несовершенно. Дефекты кристаллографического строения подразделяются по геометрическим признакам на точечные (нуль-мерные), линейные (одномерные) и поверхностные (двумерные).

Точечные дефекты малы во всех трех направлениях: размеры их не превышают нескольких атомных диаметров. К точечным дефектам относятся вакансии, дислоцированные атомы и атомы примесей.

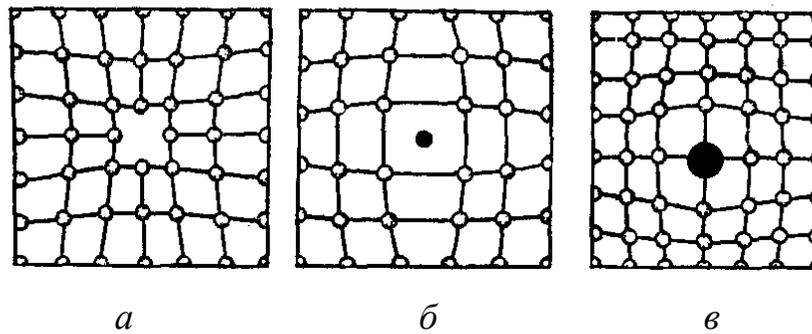


Рис. 2.6. Точечные дефекты: *a* – вакансии; *б* – дислоцированный атом; *в* – атом примеси

Вакансии – это отсутствие атомов (ионов) в узлах кристаллической решетки, «дырки», по терминологии Я. И. Френкеля, которые образовались в силу различных причин ([рис. 2.6, а](#)).

Дислоцированные атомы – атомы, вышедшие из узла кристаллической решетки и занявшие место где-то в междоузлии ([рис. 2.6, б](#)). Концентрация дислоцированных атомов невелика, так как для их образования требуется существенная затрата энергии (например, облучение металла ядерными частицами). При этом на месте переместившегося атома также образуется вакансия (механизм Я. И. Френкеля).

Поскольку практически невозможно выплавить металл химически чистым, в любом объеме металла всегда присутствует какое-то количество чужеродных атомов примесей.

Примесные атомы либо занимают в кристаллической решетке места основных атомов, либо внедряются внутрь ячейки ([рис. 2.6, в](#)).

Вокруг вакансий, дислоцированных атомов и атомов примесей всегда нарушается правильность кристаллического строения, а также уравновешенность силовых полей атомов во всех направлениях.

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении. Важнейшие виды линейных несовершенств – краевые и винтовые дислокации ([рис. 2.7](#)).

Краевая дислокация в сечении представляет собой край «лишней» полуплоскости в решетке ([рис. 2.7, а](#)). Вокруг дислокаций решетка упруго искажена.

Мерой искажения служит так называемый *вектор Бюргерса*. Он получается, если обойти замкнутый контур в идеальном кристалле ([рис. 2.8, а](#)), переходя от узла к узлу, а затем этот же путь повторить в реальном кристалле, заключив дислокацию внутрь контура. Как видно на [рис. 2.8, б](#), в реальном кристалле контур окажется незамкнутым. Вектор \vec{b} , который нужен для замыкания контура, и будет вектором Бюргерса. У краевой дислокации ([рис. 2.8, б](#)) вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен дислокационной линии, у винтовой дислокации ([рис. 2.7, б](#)) – параллелен ей.

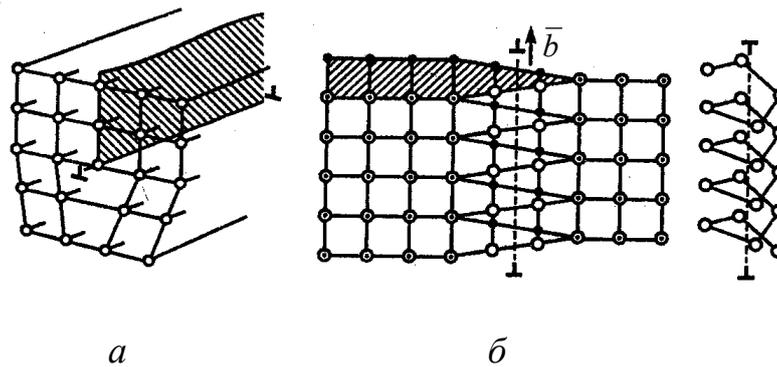


Рис. 2.7. Схемы краевой (а) и винтовой (б) дислокаций

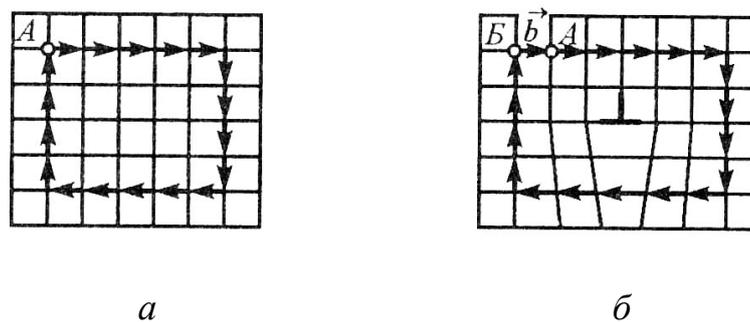


Рис. 2.8. Идеальный кристалл (а) и вектор Бюргерса у краевой дислокации в реальном кристалле (б)

Полные дислокации легко перемещаются под действием напряжений в отличие от частичных дислокаций, у которых вектор Бюргерса меньше межатомного расстояния.

Внутри кристалла дислокации связаны в единую, объемную сетку; в каждом узле сетки соединены три дислокации и сумма их векторов Бюргерса равна нулю.

В кристаллах содержатся дислокации разных знаков, различающиеся ориентацией векторов Бюргерса. Дислокации одного знака, расположенные в одной плоскости, отталкиваются друг от друга, дислокации противоположных знаков притягиваются.

Плотность дислокаций – это суммарная длина всех линий дислокаций в единице объема. В полупроводниковых кристаллах она равна 10^4 – 10^5 см⁻², у отожженных металлов – 10^6 – 10^8 см⁻². При холодном пластическом деформировании плотность дислокаций возрастает до 10^{11} – 10^{12} см⁻². Попытка увеличить плотность свыше 10^{12} см⁻² быстро приводит к появлению трещин и разрушению металла.

Дислокации возникают при кристаллизации, плотность их большая, поэтому они значительно влияют на свойства материалов. Дислокации наряду с другими дефектами участвуют в фазовых превращениях.

Вдоль дислокаций скорость диффузии на несколько порядков выше, чем сквозь кристаллическую решетку без дефектов. Дислокации служат мес-

том концентрации примесных атомов, в особенности примесей внедрения, так как это уменьшает искажения решетки.

Поверхностные дефекты. Поликристаллический сплав содержит огромное число мелких зерен (рис. 2.9). В соседних зернах решетки ориентированы различно (рис. 2.10), и граница между зернами представляет собой переходный слой 1–5 нм, в котором нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей. Границы между зернами называются *большеугловыми* (рис. 2.9), так как соответственные кристаллографические направления в соседних зернах образуют углы в десятки градусов.

Каждое зерно, в свою очередь, состоит из субзерен (блоков). *Субзерно* представляет собой часть кристалла относительно правильного строения, а его границы – стенки дислокаций, которые разделяют зерно на отдельные субзерна (рис. 2.10). Угол взаимной разориентации между соседними субзернами невелик. Там возникают малоугловые границы, на которых также скапливаются примеси.

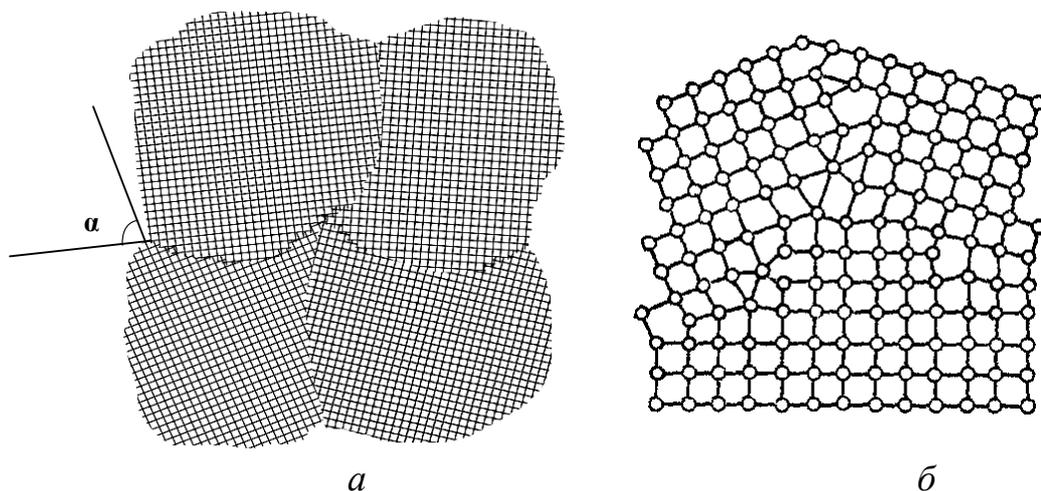


Рис. 2.9. Схема строения поликристалла: *а* – большеугловые границы между зернами; *б* – переходный слой (граница)

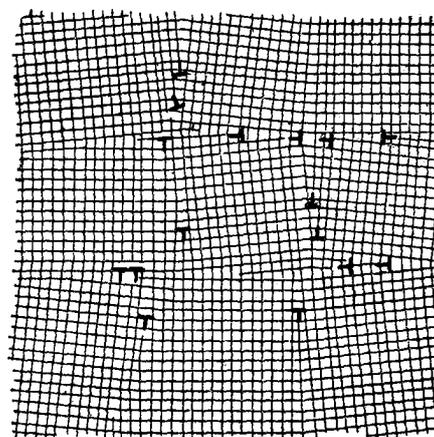


Рис. 2.10. Схема блочной (мозаичной) структуры зерен

Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства материалов. Особенно большое значение имеют границы зерен. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Вдоль границ зерен и субзерен быстро протекает диффузия, во много раз быстрее, чем сквозь кристалл, особенно при нагреве.

Взаимодействие между дефектами, перемещение их в кристаллах, изменение концентрации дефектов – все это отражается на свойствах материалов и имеет большое практическое значение.

2.4. Свойства материалов

Свойство – это количественная или качественная характеристика материала, определяющая его общность или различие с другими материалами.

Выделяют три основные группы свойств материалов: эксплуатационные, технологические и стоимостные. Они лежат в основе выбора материала, определяют техническую и экономическую целесообразность его применения. Первостепенное значение имеют эксплуатационные свойства.

Эксплуатационными называют свойства материала, которые определяют работоспособность деталей машин, приборов или инструментов, их силовые, скоростные, стойкостные и другие технико-эксплуатационные показатели.

Работоспособность подавляющего большинства деталей машин и изделий обеспечивает уровень механических свойств, которые характеризуют поведение материала под действием внешней нагрузки. Так как условия нагружения деталей машин чрезвычайно разнообразны, механические свойства включают большую группу показателей.

Работоспособность отдельной группы деталей машин зависит не только от механических свойств, но и от сопротивления воздействию химически активной рабочей среды. Если такое воздействие значительно, то определяющими становятся *физико-химические свойства* материала – жаростойкость и коррозионная стойкость.

Среди *технологических свойств* главным является технологичность материала – его пригодность для изготовления деталей машин, приборов и инструментов требуемого качества при минимальных трудовых затратах. Она оценивается: обрабатываемостью резанием; давлением; свариваемостью; способностью к литью; склонностью к деформации и короблению при термической обработке.

Литейные свойства определяются жидкотекучестью, усадкой и склонностью к ликвации.

Деформируемость – это способность принимать необходимую форму под влиянием внешней нагрузки без разрушения и при наименьшем сопротивлении нагрузке, т. е. способность металла к обработке давлением.

Свариваемость – это способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения требуемого качества.

Технологичность материала имеет важное значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

При обработке материалов и эксплуатации изделий из них большое значение имеют *физические свойства материалов*, к которым относятся: температура плавления, плотность, электросопротивление, теплопроводность и др.

Механические свойства материалов. Внешние нагрузки, действующие на элементы конструкций и детали машин, распределены по площади или объему. В зависимости от изменения во времени нагрузки разделяются на статические и динамические. *Статическое нагружение* характеризуется малой скоростью изменения своей величины. *Динамические нагрузки* изменяются во времени с большими скоростями, например при ударном нагружении.

Под действием внешних нагрузок и структурно-фазовых превращений в материале конструкции возникают внутренние силы – *напряжения*.

В простейшем случае осевого растяжения цилиндрического стержня (рис. 2.11, а) напряжение σ в поперечном сечении легко определить как отношение растягивающей силы P к площади поперечного сечения F_0 , т. е. $\sigma = P/F_0$.

В общем случае, когда сила P не перпендикулярна плоскости рассматриваемого сечения F_1 (рис. 2.11, б), полное напряжение σ_1 можно разложить на две составляющие: нормальное напряжение σ_n , направленное перпендикулярно данной плоскости, и касательное τ , направленное вдоль этой плоскости. На рис. 2.11, б наклонная плоскость F_1 расположена под углом α к плоскости поперечного сечения стержня. Площадь наклонного сечения $F_1 = F_0/\cos \alpha$. В плоскости этого сечения действует общее напряжение $\sigma_1 = P/F_1 = \sigma \cos \alpha$. Разлагая это напряжение по правилу параллелограмма на составляющие, получаем, что нормальное напряжение $\sigma_n = \sigma \cos^2 \alpha$, а касательное напряжение $\tau = \sigma \cos \alpha \sin \alpha = 0,5 \sigma \sin 2\alpha$. Отсюда следует, что максимальное нормальное напряжение возникает при $\alpha = 0^\circ$ и равно σ , а максимальное касательное напряжение возникает при $\alpha = 45^\circ$ и равно $\sigma/2$.

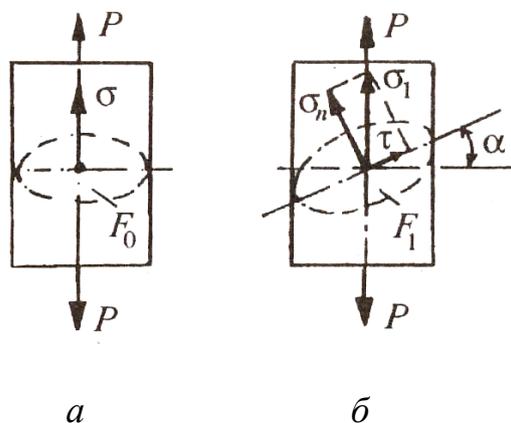


Рис. 2.11. Схема нормальных и касательных напряжений

Действие внешних нагрузок приводит к деформации тела, т. е. к изменению его размеров и формы. Деформация, исчезающая после нагрузки,

называется *упругой*. При *пластической* (остаточной) деформации изменение размеров и формы сохраняется после прекращения действия нагрузки.

Упругопластическая деформация при достижении высоких напряжений может завершиться разрушением тела. Под *разрушением* понимают процесс зарождения в материале трещин, приводящий к разделению его на части.

Разрушение может быть хрупким и вязким. Механизм зарождения трещин при этом одинаков: микротрещины возникают в основном вследствие скопления движущихся дислокаций перед препятствием (границей зерен, неметаллическими включениями и т. д.).

При *хрупком разрушении* под действием нормальных напряжений возникающая трещина становится нестабильной и растет самопроизвольно. Скорость распространения хрупкой трещины велика (для стали 2500 м/с), поэтому хрупкое разрушение называется также «внезапным» или «катастрофическим».

При *вязком разрушении* под действием касательных напряжений велика величина пластической деформации. Зона пластической деформации развивается впереди распространяющейся трещины, при этом сама трещина затупляется у своей вершины. Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью распространения трещины.

Разработаны различные методы испытаний, с помощью которых определяются механические свойства металлов при динамических и циклических нагрузках. Наиболее распространены статические испытания на твердость и растяжение.

Кроме статических и динамических испытаний в необходимых случаях производят испытания на выносливость (усталость), ползучесть и износ, которые дают более полное представление о свойствах материалов.

Механические свойства, определяемые при статических нагрузках. Испытания на растяжение являются основными для определения прочностных, упругих и пластических свойств металлов.

Прочность – это способность твердого тела сопротивляться деформации или разрушению под действием статических и динамических нагрузок. Прочность определяют с помощью специальных образцов, изготовленных из исследуемого материала.

При статических испытаниях на растяжение образец находится в равновесии под действием растягивающих сил, вызывающих в материале напряжение.

Для статических испытаний изготавливают обычно круглые образцы ([рис. 2.12, а](#)) испытуемого металла или плоские (для листовых материалов). Образцы состоят из рабочей части и головок, предназначенных для закрепления их в захватах разрывной машины. Размеры образцов стандартизованы. Для круглых образцов отношение расчетной начальной длины l_0 к начальному диаметру d_0 (на [рис. 2.12](#) $d_0 = 10$ мм) называется *кратностью образца*. На практике применяются образцы с кратностью 2,5; 5; 10.

2.4. Свойства материалов

Большинство современных машин снабжено диаграммным устройством, автоматически записывающим диаграмму растяжения.

Растягивающее усилие создает напряжение в испытуемом образце и вызывает его удлинение. Когда напряжение превышает прочность образца, он разрывается.

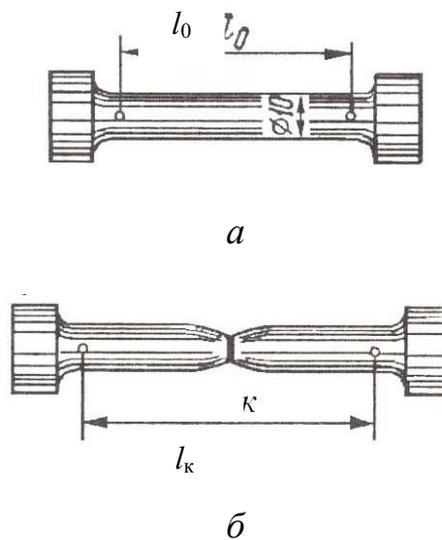


Рис. 2.12. Образцы испытуемого металла на прочность и пластичность при растяжении: а – до испытания (с длиной l_0); б – после испытания (с длиной l_k)

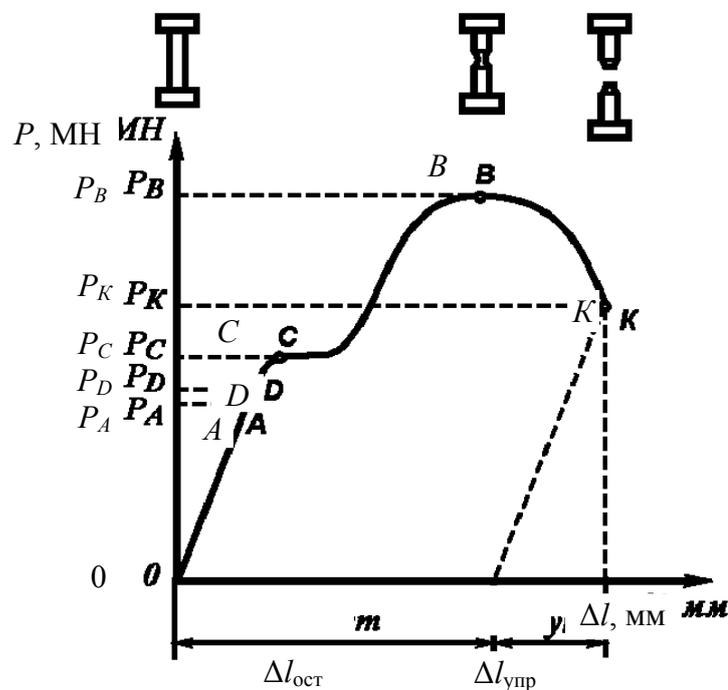


Рис. 2.13. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

На [рис. 2.13](#) приведена диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали. По оси ординат откладывается усилие P , МН, по оси абсцисс – деформация

(абсолютное удлинение) образца Δl , мм. Эта диаграмма получается при медленном увеличении растягивающего усилия вплоть до разрыва испытуемого образца.

Напряжение σ , МПа, определяется как отношение усилия P к площади поперечного сечения образца F_0 , мм²:

$$\sigma = P / F_0.$$

На диаграмме можно отметить несколько характерных точек. Участок OA является отрезком прямой и показывает, что до точки A удлинение образца пропорционально нагрузке: каждому приращению нагрузки соответствует одинаковое приращение деформации. Такая зависимость между удлинением образца и приложенной нагрузкой P_A соответствует пределу пропорциональности $P_{\text{пц}}$.

При дальнейшем нагружении образца наблюдается отклонение от закона пропорциональности: на диаграмме появляется криволинейный участок, но до точки D деформации образца упругие. Напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию, называется *пределом упругости* $\sigma_{\text{упр}}$, МПа, и определяется по формуле

$$\sigma_{\text{упр}} = P_D / F_0.$$

Точкой C на диаграмме отмечено начало горизонтальной площадки, которая показывает, что образец удлиняется без увеличения нагрузки: металл как бы течет. Напряжение, при котором без заметного увеличения нагрузки продолжается деформация образца, называется *физическим пределом текучести* σ_T , МПа, и определяется по формуле

$$\sigma_T = P_C / F_0,$$

где P_C – нагрузка в точке C .

Текучесть характерна лишь для низкоуглеродистой отожженной стали и для латуни некоторых марок. Стали с большим массовым содержанием углерода и другие металлы не имеют площадки текучести на диаграмме растяжения. Для таких металлов определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, при котором растягиваемый образец получает остаточное удлинение, равное 0,2 % своей расчетной длины:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0.$$

Точка B показывает наибольшую нагрузку, которую может выдержать образец. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца, называется *временным сопротивлением разрыву* или *пределом прочности* σ_B и определяется по формуле

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0,$$

где P_{\max} – нагрузка в точке B .

При разрыве в точке K упругая деформация $\Delta l_{\text{упр}}$ исчезает (она в любой точке кривой соответствует отрезку, отсекаемому на оси абсцисс нормалью этой точки и прямой, проведенной из этой точки и параллельной отрезку OA). Длина образца увеличилась на абсолютное *остаточное удлинение* – $\Delta l_{\text{ост}}$, значение которого указано на оси абсцисс диаграммы растяжения и определяет пластичность испытываемого материала.

Пластичность – это способность материала получать остаточное изменение формы и размера без разрушения.

Для оценки пластичности металла важно знать относительное удлинение δ , %, и относительное сужение площади поперечного сечения Ψ , %.

Относительное удлинение определяют по формуле

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100 = -\frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} 100,$$

где l_k – длина образца после разрыва (конечная), мм; l_0 – первоначальная длина образца, мм.

Относительное сужение определяют по формуле

$$\Psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100,$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, мм²; F_k – площадь в месте разрыва, мм².

У хрупких металлов относительное удлинение δ и относительное сужение Ψ близки к нулю, у пластичных металлов они достигают нескольких десятков процентов.

Модуль упругости E , МПа, – отношение напряжения в металле при растяжении к соответствующему относительному удлинению в пределах упругой деформации (отрезок OB на диаграмме растяжения):

$$E = \sigma / \delta.$$

Модуль упругости характеризует жесткость металла, его сопротивление деформации.

Таким образом, при статическом испытании на растяжение определяют характеристики прочности, упругости и пластичности.

В отличие от прочностных характеристик материала определение твердости производится быстро и не требует специальных образцов.

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в его поверхность другого, не получающего остаточных деформаций тела.

Сведения о твердости позволяют в некоторых случаях судить о других механических свойствах металлов, например о прочности. Поэтому испытания на твердость широко применяют в практике. Наибольшее распространение имеют методы вдавливания твердого наконечника, рассмотренные ниже.

По методу Бринелля стальной закаленный шарик диаметром D (10; 5; 2,5; 2 или 1 мм) вдавливают в испытуемый образец силой P (рис. 2.14, а). В результате на поверхности образца остается отпечаток в форме лунки диаметром d . Размер отпечатка (рис. 2.14, б) будет тем меньше, чем тверже металл. Твердость по Бринеллю, HB (Hardness Brinell), вычисляют по формуле

$$HB = P/F,$$

где P – нагрузка на шарик, Н; F – площадь поверхности отпечатка, мм².

Число твердости по Бринеллю записывают без единиц измерения.

Для испытания с использованием того или иного шарика установлен определенный интервал нагрузок. Испытания по Бринеллю производят на прессах ТШ (рис. 2.14, в). В государственных стандартах и справочниках твердость по Бринеллю при испытании шариком диаметром 10 мм и нагрузкой 30 000 Н обозначают числом, характеризующим значение твердости, и буквами HB, например 185 HB. По этому методу можно испытывать материалы твердостью не более 450 HB.

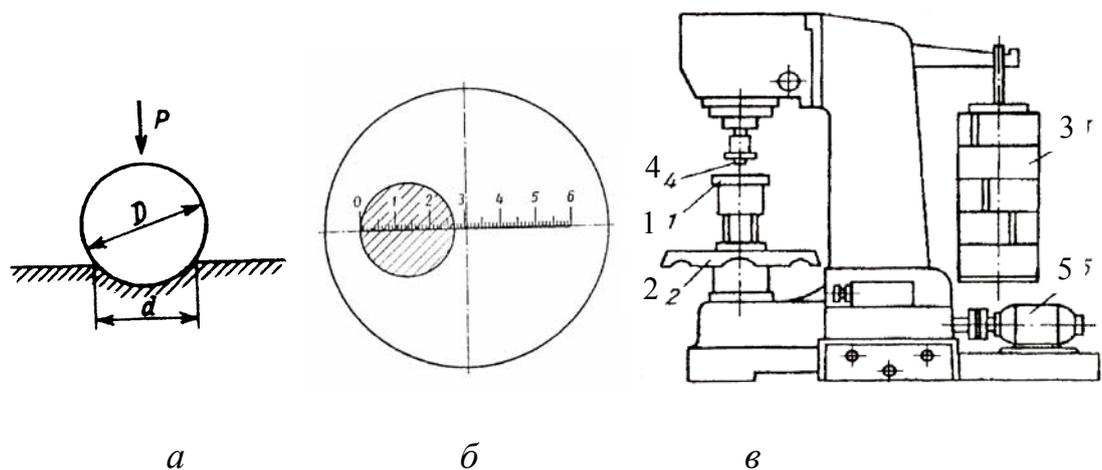


Рис. 2.14. Определение твердости по методу Бринелля: а – схема; б – отпечаток стального шарика на изучаемом образце; в – пресс ТШ для измерения твердости: 1 – столик; 2 – маховик; 3 – нагрузка; 4 – закаленный шарик; 5 – электродвигатель

Метод Роквелла для определения твердости менее трудоемкий и более универсальный. Ее определяют вдавливанием в поверхность образца алмазного конуса с углом 120° или стального шарика диаметром 1,58 мм (1/16 дюйма).

Образец помещают на столик *1* твердомера ТК (рис. 2.15) и вращением маховика *2* поднимают его до соприкосновения с алмазным конусом *3* или стальным шариком, закрепленным на наконечнике *5*. Вращение маховика продолжают до достижения давления на образец 100 Н (предварительная нагрузка), что показывает малая стрелка индикатора *6*. Затем включают основную нагрузку рукояткой *4*. Вдавливание длится 5–6 с, затем нагрузка снимается.

Твердость по Роквеллу является величиной условной, характеризующей разность глубин отпечатков. Одно деление шкалы прибора соответствует 2 мкм глубины проникновения алмазного конуса или шарика в образец. Твердость обозначают числом, определяющим уровень твердости, и буквами HR (Hardness Rockwell) с указанием шкалы твердости, например: 70 HRA, 58 HRC, 50 HRB.

Шкала А (наконечник – алмазный конус, общая нагрузка – 588 Н) применяется для особо твердых материалов, для тонких листовых материалов или тонких (0,5–1,0 мм) слоев. Измеренную твердость обозначают HRA. Пределы измерения твердости по шкале – 70–85.

Шкала В (наконечник – стальной шарик, общая нагрузка – 981 Н) применяется для определения твердости сравнительно мягких материалов (< 400 HB). Пределы измерения твердости по шкале – 25–100.

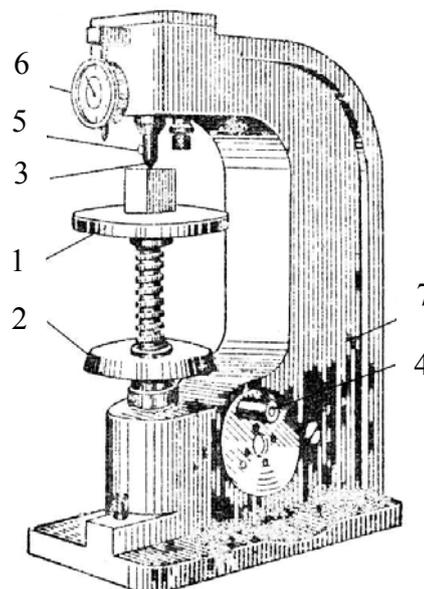


Рис. 2.15. Твердомер ТК для измерения твердости по Роквеллу:
1 – столик; *2* – маховик; *3* – алмазный конус; *4* – рукоятка;
5 – наконечник; *6* – индикатор; *7* – станина

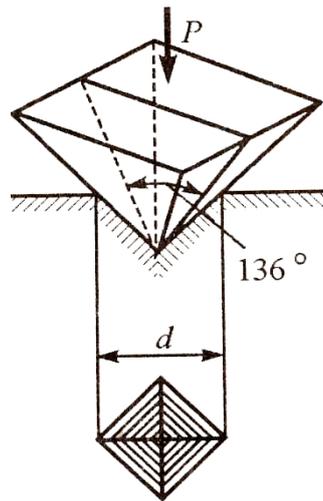


Рис. 2.16. Схема определения твердости по Виккерсу

Шкала С (наконечник – алмазный конус, общая нагрузка – 1472 Н) используется для твердых материалов (> 450 НВ), например закаленных сталей. Измеренную твердость обозначают HRC. Пределы измерения твердости по шкале – 20–67. Например: HRC 45.

Числа твердости по Роквеллу не имеют точных соотношений с числами твердости по Бринеллю.

Метод Виккерса. При стандартном методе определения твердости по Виккерсу в поверхность образца вдавливают четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° . Отпечаток получается в виде квадрата (рис. 2.16), диагональ которого измеряют после снятия нагрузки.

На практике твердость по Виккерсу определяют по специальным таблицам (по значению диагонали отпечатка при выбранной нагрузке). Твердость по Виккерсу указывается в единицах HV (Hardness Vickers, название от английского военно-промышленного концерна «Виккерс»).

Метод Виккерса применяют главным образом для материалов, имеющих высокую твердость, а также для испытания на твердость деталей малых сечений или тонких поверхностных слоев. Как правило, используют небольшие нагрузки: 10, 30, 50, 100, 200, 500 Н. Чем тоньше сечение детали или исследуемый слой, тем меньше выбирают нагрузку.

Числа твердости по Виккерсу и по Бринеллю для материалов, имеющих твердость до 450 НВ, практически совпадают.

Механические свойства, определяемые при динамических нагрузках. При работе деталей машин возможны динамические нагрузки, при которых многие металлы проявляют склонность к хрупкому разрушению. Опасность разрушения усиливают надрезы – концентраторы напряжений. Для оценки склонности металла к хрупкому разрушению под влиянием этих факторов проводят динамические испытания на ударный изгиб на маятниковых копрах (рис. 2.17, а). Стандартный образец устанавливают на две опоры и посередине наносят удар, приводящий к разрушению образца

(рис. 2.17, б). По шкале маятникового копра определяют работу K , H , затраченную на разрушение, и рассчитывают основную характеристику, получаемую в результате этих испытаний, – ударную вязкость:

$$KC = K / S_0^1,$$

где S_0^1 – площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

Единица измерения ударной вязкости – джоуль на квадратный метр ($\text{Дж}/\text{м}^2$).

Предусмотрены испытания образцов с концентратором напряжений трех видов: U -образным (радиус надреза $r = 1$ мм), V -образным ($r = 0,25$ мм) и T -образным (трещина усталости, созданная в основании надреза). Соответственно ударную вязкость обозначают KCU , KCV , KCT .

Основным критерием ударной вязкости является KCU , включающая две составляющие:

$$KCU = KC_3 + KC_p,$$

где KC_3 – работа зарождения трещины; $KC_p \approx KCT$ – работа распространения трещины.

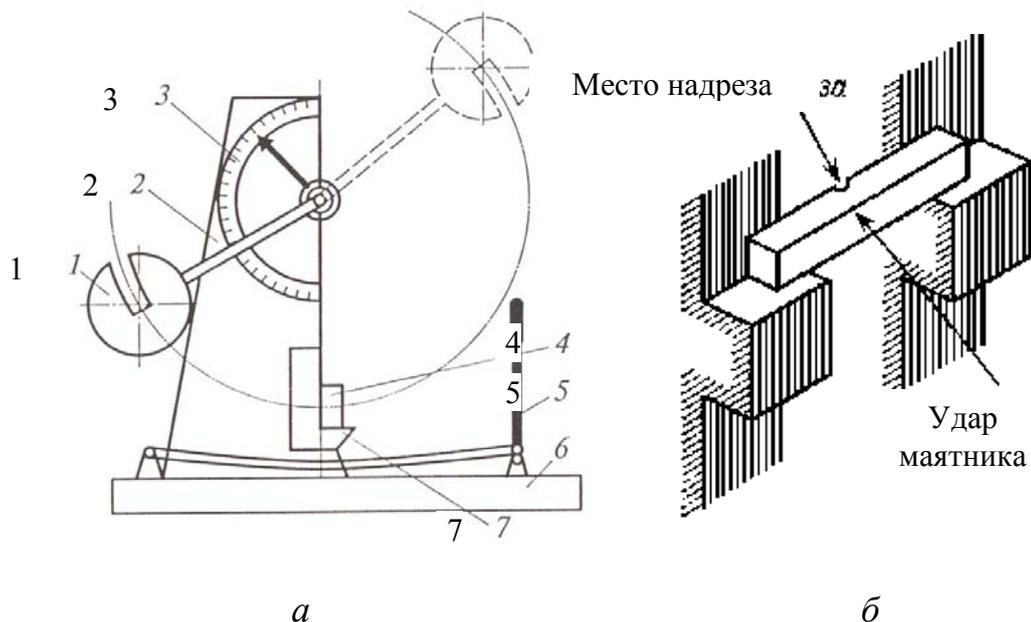


Рис. 2.17. Схема испытаний на ударную вязкость: а – маятниковый копер: 1 – нож; 2 – стойка; 3 – шкала; 4 – образец; 5 – ручной тормоз; б – основание; 7 – опоры образца; б – испытание на ударный изгиб U -образного образца

Чем острее надрез, тем меньше KC_3 . Критерий KCT является критерием трещиностойкости, оценивающим сопротивление материала распространению трещины.

Ударная вязкость из всех характеристик механических свойств наиболее чувствительна к снижению температуры. Поэтому испытания на ударную вязкость при пониженных температурах используют для определения *порога хладноломкости* – температуры или интервала температур, в котором происходит снижение ударной вязкости.

Хладноломкость – свойство металлического материала терять вязкость, хрупко разрушаться при понижении температуры. На переход от вязкого разрушения к хрупкому указывают изменения строения излома и резкое снижение ударной вязкости. Порог хладноломкости обозначают интервалом температур либо одной температурой t_{50} , при которой *КСТ* снижается наполовину.

Механические свойства, определяемые при переменных (циклических) нагрузках. Многие детали машин (валы, шатуны, зубчатые колеса) испытывают во время работы повторяющиеся циклические нагружения. *Цикл напряжения* – совокупность изменения напряжений между двумя его предельными значениями σ_{\max} и σ_{\min} в течение периода T . При экспериментальном исследовании сопротивления усталости материала за основной принят синусоидальный цикл изменения напряжения (рис. 2.18, а), который характеризуется коэффициентом асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

Различают симметричные циклы ($R = -1$) и асимметричные (R изменяется в широких пределах). Различные виды циклов характеризуют различные режимы работы деталей машин.

Процессы постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящие к изменению его свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, называют *усталостью*, а свойство противостоять усталости – *выносливостью*.

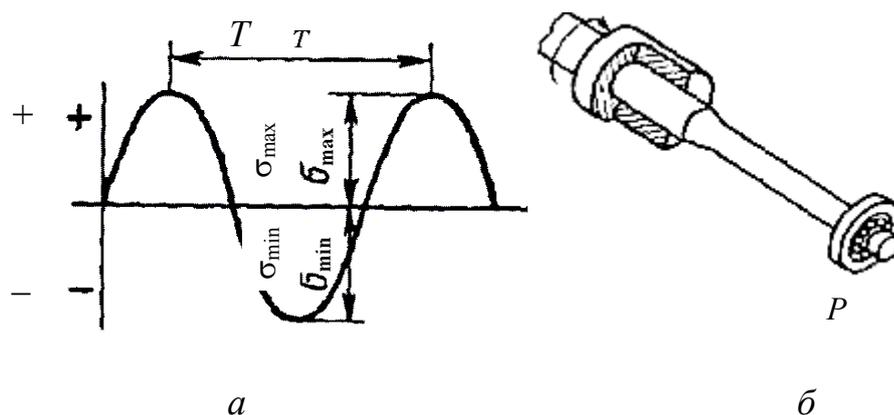


Рис. 2.18. Схема испытаний на усталость:
а – диаграмма циклического изменения напряжений; б – образец

Разрушение от усталости по сравнению с разрушением от статической нагрузки имеет ряд особенностей, а именно:

- происходит при напряжениях, меньших, чем при статической нагрузке (меньше предела текучести или прочности);
- начинается на поверхности (или вблизи от нее) локально, в местах концентрации напряжений. Локальную концентрацию напряжений создают повреждения поверхности в результате циклического нагружения либо надрезы в виде следов обработки или воздействия среды;
- протекает в несколько стадий, характеризующих процессы накопления повреждений в материале, образования трещин усталости, постепенное развитие и слияние некоторых из них в одну магистральную трещину и быстрое окончательное разрушение;
- имеет характерное строение излома, отражающее последовательность процессов усталости. Излом состоит из очага разрушения (места образования микротрещин) и двух зон – усталости и долома (см. [рис. 2.19](#)).

Очаг разрушения примыкает к поверхности и имеет небольшие размеры и гладкую поверхность.

Зону усталости формирует последовательное развитие трещины усталости. В этой зоне видны характерные бороздки, которые имеют конфигурацию колец, что свидетельствует о скачкообразном продвижении трещины усталости. Зона усталости развивается до тех пор, пока в уменьшающемся рабочем сечении напряжения не возрастут настолько, что вызовут его мгновенное разрушение. Эту последнюю стадию разрушения характеризует зона долома.

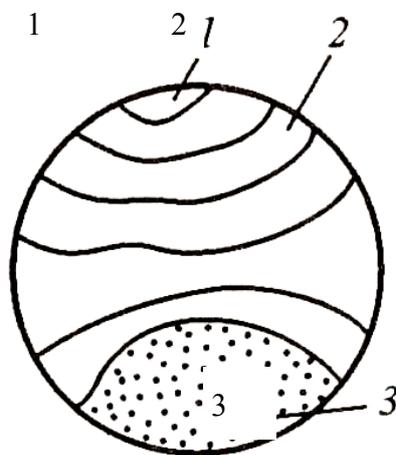


Рис. 2.19. Излом усталостного разрушения: 1 – очаг зарождения трещины; 2 – зона усталости; 3 – зона долома

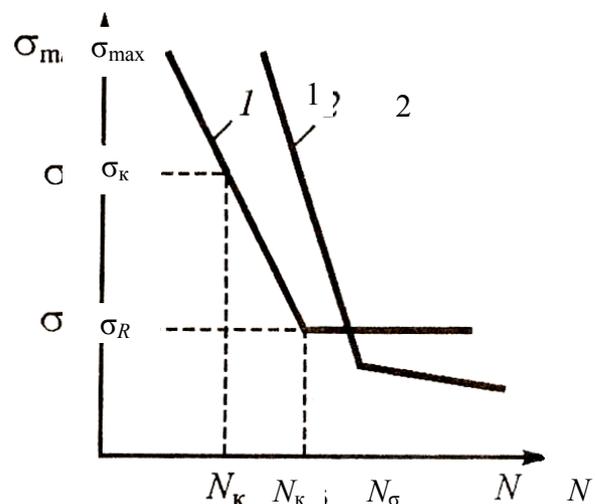


Рис. 2.20. Кривые усталости для стали (1) и цветных металлов (2)

О способности материала работать в условиях циклического нагружения судят по результатам испытаний образцов на усталость. Их проводят на специальных машинах, создающих в образцах многократное нагружение (растяжение-сжатие, изгиб, кручение). Образцы (не менее 15 шт.) испыты-

вают последовательно на разных уровнях напряжений, определяя число циклов до разрушения. Результаты испытаний изображают в виде кривой усталости, которая (в логарифмических координатах: максимальное напряжение цикла σ_{\max} – число циклов нагружений N) состоит из участков прямых линий (рис. 2.20). Горизонтальный участок определяет напряжение, которое не вызывает усталостного разрушения после неограниченно большого или заданного (базового N_{σ}) числа циклов. Это напряжение представляет собой физический предел выносливости σ_R (R – коэффициент асимметрии цикла) при симметричном цикле σ_{-1} .

Наклонный участок кривой усталости характеризует ограниченный предел выносливости σ_k , который может выдержать материал в течение определенного числа циклов N_k .

Кривые с горизонтальным участком типичны для сталей при невысоких температурах испытаний. Кривые без горизонтального участка характерны для цветных металлов, а также для всех материалов, работающих при высоких температурах или в коррозионной среде. Такие материалы имеют только ограниченный предел выносливости.

Кривые усталости позволяют определить следующие критерии выносливости:

циклическую прочность – физический предел выносливости. Она характеризует несущую способность материала, т. е. то наибольшее напряжение, которое он способен выдержать за определенное время работы;

циклическую долговечность – число циклов (или эксплуатационных часов), которые выдерживает материал до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения при заданном напряжении.

2.5. Классификация металлических материалов

2.5.1. Сплавы на основе железа

Железо – металл серебристо-белого цвета. Атомный номер 26, атомная масса 55,85. Технические сорта железа содержат 99,8–99,9 % Fe. Температура плавления железа 1539 °С. Известны две полиморфные модификации: α и γ . Модификация α -Fe существует ниже 911 °С и выше 1392 °С, имеет решетку ОЦК с периодом 0,286 нм (при 20–25 °С). Для интервала температур 1392–1539 °С α -железо нередко обозначают как δ -железо.

До температуры 768 °С α -железо магнитно (ферромагнитно). Критическую точку (768 °С), соответствующую магнитному превращению, т. е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют *точкой Кюри* и обозначают A_2 .

Модификация γ -Fe существует в интервале температур от 911 до 1392 °С, имеет ГЦК-решетку, период которой при 911 °С равен 0,364 нм. Решетка

ГЦК более компактна, чем решетка ОЦК. В связи с этим при пре-вращении α -железа в γ -железо объем уменьшается приблизительно на 1 %.

Углерод является неметаллическим элементом II периода четвертой группы, атомный номер 6, плотность 2,5 г/см³, атомная масса 12,011, температура плавления 3500 °С. Углерод полиморфен. В обычных условиях он находится в виде модификации графита, но может существовать и в виде метастабильной модификации алмаза.

Углерод растворим в железе в жидком и твердом состоянии, также может присутствовать в его сплавах в виде химического соединения – цементита, а в высокоуглеродистых сплавах – и в виде графита.

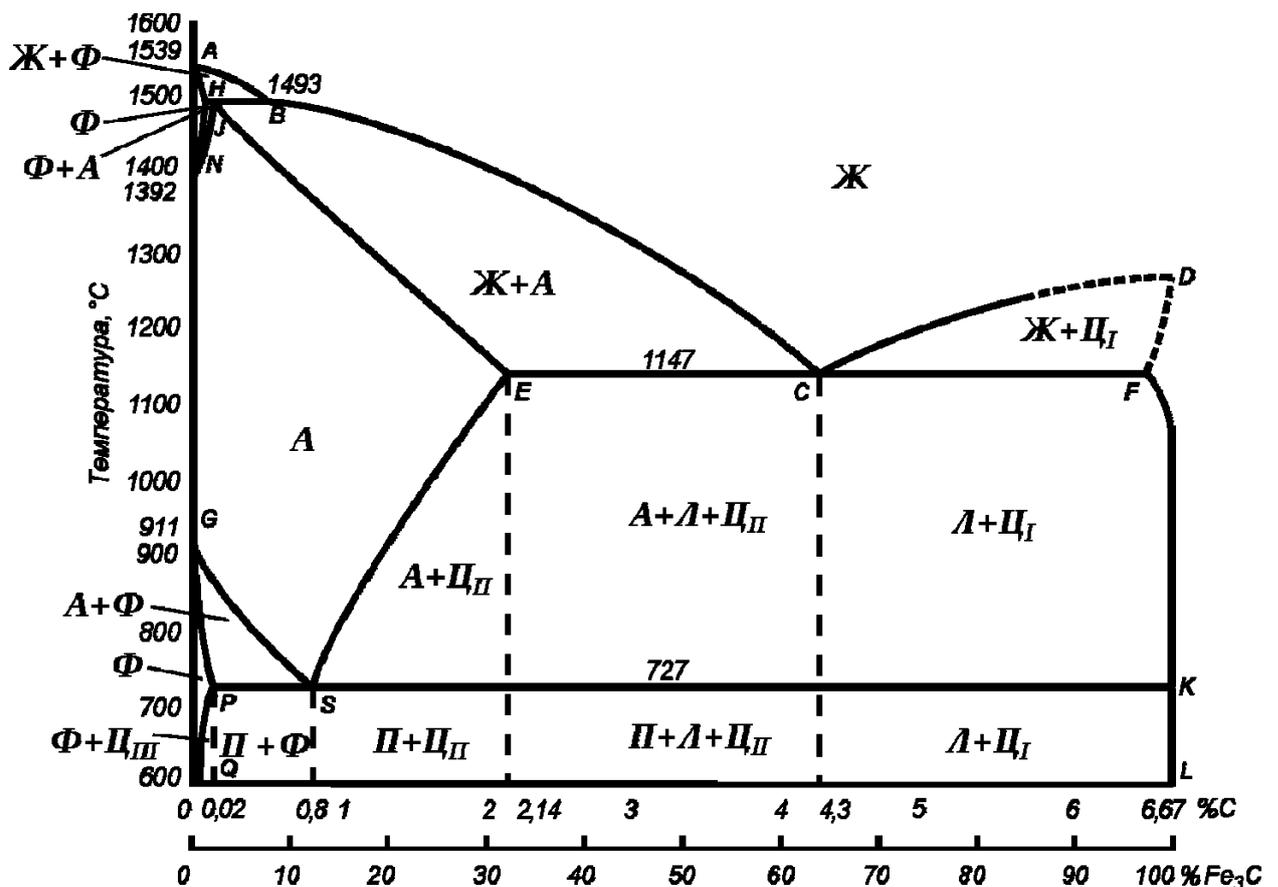


Рис. 2.21. Диаграмма состояния Fe–Fe₃C

Диаграммой состояния называется графическое изображение фазового состава сплавов в зависимости от температуры и концентрации химических компонентов в условиях термодинамического равновесия системы. На [рис. 2.21](#) изображена диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов, имеющая большое практическое значение: ее используют для определения видов и температурных интервалов термической обработки стали, для назначения температурного интервала при обработке давлением, для определения температуры плавления и заливки сплавов.

Фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.

В зависимости от температуры и концентрации углерода железоуглеродистые сплавы имеют следующие составляющие.

Аустенит – твердый раствор углерода в γ -железе с предельной концентрацией углерода 2,14 % при температуре 1147 °С; с понижением температуры до 727 °С концентрация углерода уменьшается до 0,8 %. Сталь со структурой аустенита имеет высокие пластичность и вязкость. Аустенит немагнитен.

Феррит – твердый раствор углерода в α -железе с предельной концентрацией углерода 0,02 % при температуре 727 °С. Сталь со структурой феррита ферромагнитна вплоть до температуры Кюри 770 °С, имеет малую твердость и высокую пластичность.

Цементит – химическое соединение железа с углеродом Fe_3C (6,67 % С); ферромагнитен до температуры Кюри 210 °С, имеет высокие твердость и хрупкость.

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде аустенита (0,8 % С). Сплав, имеющий структуру перлита, ферромагнитен, обладает повышенными прочностью и твердостью.

Ледебурит (4,3 % С) – эвтектическая смесь аустенита и цементита; ниже температуры 727 °С аустенит превращается в перлит, при этом образуется смесь перлита и цементита – превращенный ледебурит.

Графит – углерод в свободном состоянии, образующийся в результате распада цементита при медленном охлаждении. Графит немагнитен, мягок и обладает низкой прочностью.

Основные свойства сплава определяются содержанием углерода. Взаимодействие углерода с α - или γ -модификациями железа приводит к образованию железоуглеродистых сплавов, различных по строению и свойствам. Построение диаграммы состояния железо – углерод (цементит) дает представление о температурах и концентрационных границах существования этих сплавов.

На диаграмме состояния железо – цементит (рис. 2.21): линия *ABCD* – линия ликвидуса, выше нее сплав находится в жидком состоянии; линия *AECF* – линия солидуса, ниже нее сплав находится в твердом состоянии. При температурах, соответствующих линии *AECF*, заканчивается первичная кристаллизация. В точке *C* при концентрации углерода 4,3 % образуется эвтектика – ледебурит. Линия *PSK* – линия эвтектоидного превращения, на которой заканчивается процесс вторичной кристаллизации. Линия *PS* – линия нижних критических точек A_1 . Линия *GSE* – начало процесса вторичной кристаллизации твердого раствора. Линия *GS* – линия верхних критических точек, она показывает температуру начала выделения феррита из аустенита. Линия *SE* – линия верхних критических точек A_{cm} , она показывает температуру начала выделения вторичного цементита и является линией, определяющей предельную растворимость углерода в аустените.

Сплавы, содержащие до 2,14 % С, называют *сталями*. Сплавы, содержащие более 2,14 % С, – *чугунами*. Сталь, содержащая 0,8 % С, называется *эвтектоидной сталью*; сталь, содержащая менее 0,8 % С, – *доэвтектоидной*; сталь, содержащая более 0,8 % С, – *заэвтектоидной*.

2.5.2. Классификация сталей

Стали относятся к сплавам на основе железа с углеродом (углеродистые стали). Стали, дополнительно содержащие хром, марганец, кремний, никель, молибден и другие элементы, называют *легированными сталями*.

Стали являются основными и наиболее распространенными сплавами для изготовления деталей конструкций, инструмента и изделий специального назначения. Сплавы на основе железа имеют хорошее сочетание высокой прочности, твердости, пластичности, вязкости и технологичности.

Таблица 2.1

Массовая доля серы и фосфора в углеродистых конструкционных сталях, %, не более

Категория качества стали	Фосфор	Сера	Признак качества
Обыкновенного качества конструкционная	0,04	0,05	В начале марки – Ст
Качественная конструкционная углеродистая	0,035	0,04	По умолчанию
Качественная инструментальная углеродистая	0,030	0,028	По умолчанию
Высококачественная инструментальная углеродистая	0,025	0,018	В конце марки – А
Высококачественная конструкционная легированная	0,025	0,025	В конце марки – А
Особовысококачественная конструкционная легированная	0,025	0,015	В конце марки – Ш

По химическому составу стали классифицируют на *углеродистые* и *легированные*.

По назначению стали подразделяют на *конструкционные*, *инструментальные* и стали *специального назначения*.

По способу производства изделий стали классифицируют на *деформируемые* и *литейные*.

По металлургическому качеству в зависимости от содержания вредных примесей стали подразделяют на категории: *стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные, особовысококачественные.*

К наиболее вредным примесям сталей относятся сера и фосфор. Сера приводит к *красноломкости* стали, т. е. к хрупкости при горячей обработке давлением. Марганец, который вводят в сталь при раскислении, устраняет вредное влияние серы. Фосфор вызывает *хладноломкость*, т. е. охрупчивание при низких температурах. Содержание вредных примесей указано в [табл. 2.1](#).

По способу раскисления при выплавке стали классифицируют на *кипящие, спокойные и полуспокойные.*

2.5.2.1. Углеродистые стали

Углеродистые стали относятся к железоуглеродистым сплавам с содержанием углерода от 0,05 до 1,35 %. Углеродистые конструкционные стали содержат до 0,65 % С, инструментальные – более 0,65 % С.

Кроме вышеуказанной классификации углеродистые стали подразделяют на следующие группы.

По содержанию углерода углеродистые стали делятся на *низкоуглеродистые* (до 0,25 % С), *среднеуглеродистые* (0,3–0,5 % С) и *высокоуглеродистые* (более 0,50 % С).

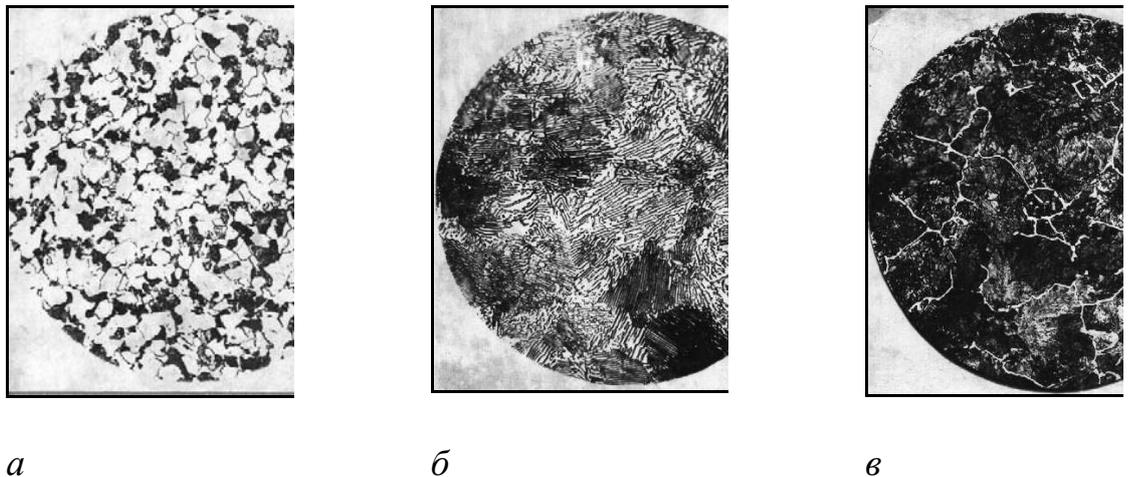


Рис. 2.22. Структура углеродистой стали:
а – доэвтектоидной; б – эвтектоидной; в – заэвтектоидной

По структуре стали подразделяют на *доэвтектоидные* (до 0,8 % С), *эвтектоидные* (0,8 % С), *заэвтектоидные* (более 0,8 % С).

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства углеродистой стали. Даже при малом изменении содержания углерода оказывает заметное влияние на свойства стали. С увеличением содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита. При содержании до 0,8 % С сталь состоит из феррита и перлита ([рис. 2.22, а](#)), при содержании более 0,8 % С в структуре стали кроме перлита появляется структурно свободный вторичный цементит ([рис. 2.22, в](#)).

Феррит имеет низкую прочность, но сравнительно пластичен. Цементит характеризуется высокой твердостью, но хрупок. Поэтому с ростом содержания углерода увеличивается твердость и прочность, однако уменьшается вязкость и пластичность стали. Рост прочности происходит при содержании углерода в стали до 0,8–1,0 %. При увеличении содержания углерода в стали более 0,8 % уменьшается не только пластичность, но и прочность стали. Это связано с образованием сетки хрупкого цементита вокруг перлитных колоний, легко разрушающейся при нагружении. По этой причине заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, в результате которого получают структуру зернистого перлита.

Углерод также оказывает существенное влияние на технологические свойства стали – свариваемость, пластичность, обрабатываемость резанием. Низкоуглеродистые стали хорошо свариваются и обрабатываются давлением.

Постоянными примесями в углеродистых сталях являются марганец, кремний, сера, фосфор, а также скрытые примеси – газы: кислород, азот, водород. К полезным примесям (технологическим добавкам) в углеродистых сталях относятся марганец, кремний, хром; их содержание обычно не превышает 1 %. Марганец и кремний вводят в сталь при раскислении, они упрочняют железо. Марганец увеличивает прокаливаемость (возможную глубину закаленного слоя) сталей, а также уменьшает вредное влияние серы. Содержание вредных примесей (серы и фосфора) регламентируется стандартами. Основным источником серы и фосфора в стали является исходное сырье – чугун. Сера снижает пластичность и вязкость стали, а также приводит к красноломкости стали при прокатке и ковке. Она образует с железом соединение FeS – сульфид железа. При нагреве стальных заготовок до температуры горячей деформации включения FeS вызывают в стали хрупкость, а в результате оплавления при деформации образуют надрывы и трещины. Фосфор, растворяясь в железе, уменьшает его пластичность. Кислород и азот мало растворимы в феррите. Они загрязняют сталь хрупкими неметаллическими включениями, снижают вязкость и пластичность стали. Повышенное содержание водорода охрупчивает сталь и приводит к образованию внутренних трещин – *флокенов*.

Углеродистые стали, как наиболее дешевые, технологичные и имеющие достаточно высокий уровень механических свойств, применяются для металлоконструкций общего назначения, используются в строительных конструкциях, для изготовления деталей в машиностроении и т. д.

Углеродистые стали по назначению подразделяют на стали общего и специального применения. К сталям специального назначения относят автоматные, котельные, строительные, стали для глубокой вытяжки.

2.5.2.2. Конструкционные углеродистые стали

Конструкционные стали – наиболее распространенные в настоящее время (и в прогнозируемом будущем) машиностроительные материалы,

позволяющие получать сочетание высоких значений механических характеристик и хорошую технологичность при сравнительно невысокой стоимости.

Конструкционные стали должны обладать высокой конструктивной прочностью, обеспечивать длительную и надежную работу конструкций в условиях эксплуатации. Материалы, идущие на изготовление конструктивных элементов, деталей машин и механизмов, должны быть вязкими и хорошо сопротивляться ударным нагрузкам. При знакопеременных нагрузках конструкционные стали должны обладать высоким сопротивлением усталости, а при трении – сопротивлением износу. Конструкционные материалы должны иметь высокие технологические свойства – хорошие литейные свойства, обрабатываемость давлением, резанием, хорошую свариваемость.

Конструкционные углеродистые стали обыкновенного качества, благодаря их технологическим свойствам, доступности и возможности получения необходимого комплекса свойств, используются при изготовлении металлоконструкций массового производства, а также слабнонагруженных деталей машин и приборов. В таких сталях допускается повышенное содержание вредных примесей, газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями, поэтому они относятся к наиболее дешевым сталям. Металлургические заводы в основном поставляют их в горячекатаном состоянии без термической обработки.

Углеродистые горячекатаные стали обыкновенного качества по ГОСТ 380–94 «Сталь углеродистая обыкновенного качества» изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст2кп, Ст2пс, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп. Буквы «Ст» обозначают «сталь», цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава стали, буквы «кп» (кипящая), «пс» (полуспокойная), «сп» (спокойная) – способ раскисления стали (рис. 2.23).



Рис. 2.23. Марка конструкционной стали обыкновенного качества

Таблица 2.2

Массовая доля элементов, %

Марка стали	Углерод	Марганец	Кремний
Ст2кп	0,09–0,15	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст3пс	0,014–0,22	0,40–0,65	0,05–0,15
Ст6сп	0,38–0,49	0,50–0,80	0,15–0,30

Массовая доля вредных примесей в стали всех марок, кроме Ст0, должна быть не более 0,050 %, фосфора – не более 0,040 %, в стали марки Ст0 серы – не более 0,060 %, фосфора – не более 0,070 %. Массовая доля углерода в сталях колеблется от 0,06 до 0,49 %, массовая доля марганца – от 0,25 до 0,80 %. Полуспокойные и спокойные стали могут содержать повышенное количество марганца (до 1,20 %), тогда в обозначении марок добавляют букву «Г», например Ст5Гпс. В кипящих сталях массовая доля кремния составляет не более 0,05 %, в полуспокойных – 0,05–0,15 %, в спокойных – 0,15–0,3 %. Химический состав сталей обыкновенного качества, по ГОСТ 380–94, приведен в [табл. 2.2](#).

Кипящие стали по ударной вязкости отличаются от спокойных и полуспокойных. Порог хладноломкости (температура перехода стали из вязкого состояния в хрупкое) у кипящей стали на 30–40 °С выше, чем у спокойной. Поэтому применение кипящих сталей при низких температурах или в конструкциях, испытывающих динамические или вибрационные нагрузки, недопустимо. Для ответственных конструкций лучше всего использовать спокойные стали.

Кипящие стали, вследствие низкого содержания кремния, имеют невысокий уровень предела текучести и упругости. Этим объясняется высокая способность кипящей стали к вытяжке при деформации.

Недостатком сталей обыкновенного качества является их малая прочность и малая хладнотойкость.

Стали обыкновенного качества Ст2пс, Ст2кп, Ст3кп применяют для неответственных, малонагруженных элементов сварных конструкций. Стали Ст4пс, Ст5сп используют для изготовления деталей клепаных конструкций, болтов, гаек, звездочек, рычагов и других изделий.

Углеродистые качественные конструкционные стали выпускаются в соответствии с ГОСТ 1050–88 «Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали», который устанавливает технические условия для горячекатаного и кованого сортового проката из сталей марок 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 11кп, 15кп, 15пс, 15, 18кп, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60 диаметром или толщиной до 250 мм. Качественные углеродистые стали маркируются буквами и цифрами. Двухзначные числа показывают содержание углерода в сотых долях процента. Последующее буквенное обозначение указывает на степень раскисления: «сп» – спокойная сталь, «пс» – полуспокойная сталь, «кп» – кипящая сталь. При отсутствии буквенного обозначения сталь относится к спокойной стали (рис. 2.24). Содержание углерода в конструкционных углеродистых сталях составляет от 0,05 до 0,65 %, марганца – от 0,25 до 0,80 %, кремния – от 0,03 до 0,37 % в зависимости от степени раскисления и содержания углерода. По содержанию углерода стали 05кп, 08, 08кп, 10, 15, 20, 25 относятся к низкоуглеродистым, стали 30, 35, 40, 45, 50 – к среднеуглеродистым ([рис. 2.24](#)), стали 55, 60 – к высокоуглеродистым.

Содержание примесей в этих сталях меньше, чем в сталях обыкновенного качества. Массовая доля серы в сталях должна быть не более 0,040 %, фосфора – не более 0,035 %, исключая марки 11кп и 18кп.

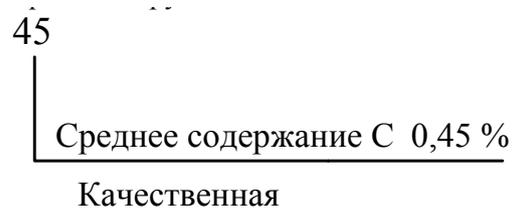


Рис. 2.24. Марка качественной конструкционной стали

Таблица 2.3

Механические свойства проката толщиной до 80 мм

Марка стали	Предел текучести σ_T , Н/мм ² , не менее	Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ² , не менее	Относительное удлинение δ , %, не менее	Относительное сужение Ψ , %, не менее
08	196	320	33	60
20	245	410	25	55
30	295	490	21	50
45	355	600	16	40
60	400	680	12	35

Важными характеристиками при выборе марки стали для изготовления детали являются механические свойства и распределение их по сечению. Механические свойства проката из углеродистой качественной конструкционной стали по ГОСТ 1050–88 приведены в [табл. 2.3](#). В соответствии с маркой стали увеличение содержания углерода приводит к росту прочности (σ_B и σ_T) и уменьшению пластичности (δ и Ψ).

Кроме содержания углерода на уровень механических свойств большое влияние оказывает термическая обработка. Прокат поставляется в отожженном, нормализованном, улучшенном состояниях.

Низкоуглеродистые кипящие стали характеризуются низким пределом текучести, так как практически не содержат кремния. Их используют для глубокой вытяжки методом холодной штамповки. Низкоуглеродистые стали типа 05кп, 08, 08кп, 10кп, 10 используются без термической обработки, они хорошо штампуются в отожженном состоянии и применяются в автомобилестроении для изготовления изделий сложной формы: крыльев, дверей, капотов, т. е. несущих деталей кузова.

Детали, имеющие высокую твердость поверхностного слоя и вязкую сердцевину, создаваемую термической или химико-термической обработкой, изготавливают из низкоуглеродистых сталей типа 15, 20, 25. Данные стали применяют для изделий, работающих в условиях повышенного износа и динамических нагрузок, но не испытывающих значительных напряжений. Из цементуемых сталей 15кп, 20, 25, 20кп изготавливают болты, винты, фланцы, рычаги, шпиндели, клапаны холодильных аппаратов, змеевики и другие детали, работающие при температурах от минус 40 до 125 °С.

Среднеуглеродистые стали используют для изготовления небольших деталей и узлов во всех отраслях машиностроения. Это улучшаемые стали, свойства которых повышаются после закалки с высоким отпуском. Они не склонны к отпускной хрупкости, дешевы, однако обладают низкой прокаливаемостью. Критический диаметр, при котором обеспечивается сквозная прокаливаемость, – не более 12 мм. Улучшаемые стали 30, 35, 40, 45 используются для изготовления деталей средних размеров несложной конфигурации, к которым предъявляются требования повышенной прочности: ролики, валики, втулки, коленчатые валы, звездочки, оси, шайбы, шатуны, зубчатые колеса, болты и др.

Высокоуглеродистые стали применяют после нормализации, закалки, отпуска или поверхностного упрочнения. Они обладают высокой прочностью и износостойкостью, а также высоким пределом упругости, в связи с чем их применяют для изготовления пружин, рессор, канатной проволоки.

2.5.2.3. Инструментальные углеродистые стали

Углеродистые инструментальные стали выпускаются по ГОСТ 1435–90 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали», который распространяется на прутки и полосы кованные, прутки, полосы и мотки горячекатаные (металлопродукцию) из инструментальной нелегированной углеродистой стали, а также в части норм химического состава – на слитки, заготовку, лист, ленту, проволоку. ГОСТ содержит следующие марки сталей: У7, У8, У8Г, У10, У12, У13, У8А, У9А, У11А и т. д. Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой «У» и последующими цифрами, показывающими содержание углерода. Если указана одна цифра, то содержание углерода соответствует десятым долям процента. Две цифры указывают на то, что содержание углерода – процент или более. Эти стали содержат углерода от 0,65 до 1,35 %, марганца и кремния – от 0,17 до 0,33 %. В марках с повышенным содержанием марганца (до 0,58 %) указывается буква «Г».

По назначению инструментальные стали делятся на стали *для режущего, измерительного и штампового инструмента*. Режущий инструмент работает в условиях длительного контакта и трения с обрабатываемым металлом. Материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твердостью (HRC 60–62) и износостойкостью. При резании

инструмент разогревается, поэтому основным требованием, предъявляемым к инструментальным материалам, является высокая теплостойкость, т. е. способность сохранять твердость и режущие свойства при длительном нагреве в процессе работы. Углеродистые и низколегированные стали имеют низкую теплостойкость, поэтому их используют при малых скоростях резания.

Штамповые стали применяют для изготовления штампов холодного и горячего деформирования, пуансонов, матриц, пресс-форм для литья под давлением. В зависимости от температурных условий эксплуатации различают штамповые стали для деформирования в холодном и горячем состоянии. Стали для штампов холодного деформирования должны обладать высокой твердостью и износостойкостью, высокой прочностью и удовлетворительной вязкостью для работы при ударных нагрузках. Стали для штампов горячего деформирования должны иметь высокую прочность, ударную вязкость, высокую окислительную стойкость и обладать высоким сопротивлением термической усталости (разгаростойкости). Углеродистые стали применяются для изготовления штампов холодного деформирования, режущего (в основном для обработки дерева) и измерительного инструмента.

Сталь, из которой изготовлена металлопродукция, по химическому составу, с учетом содержания вредных примесей, подразделяют на качественную и высококачественную. Буква «А» в конце марки указывает на то, что сталь высококачественная (рис. 2.25).

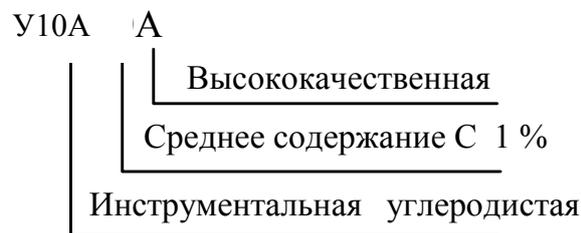


Рис. 2.25. Марка инструментальной стали

Таблица 2.4

Механические свойства инструментальной нелегированной стали

Марка стали	Твердость НВ, не менее	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²
У7, У7А, У8, У8Г	187	650
У11, У11А, У12, У12А	212	750

По состоянию материала металлопродукцию изготавливают без термической обработки, термически обработанной – Т, нагартованной – Н. В

технических требования указывают твердость обработанной металлопродукции, а также временное сопротивление разрыву (табл. 2.4).

В отожженном состоянии инструментальные стали имеют низкую твердость (НВ 150–180), что позволяет изготавливать из них инструмент резанием и давлением. После закалки инструментальные нелегированные стали получают высокую твердость в поверхностном слое (HRC 63–65) и сохраняют вязкую мягкую сердцевину, что является благоприятным для такого инструмента, как ручные метчики, пилы, напильники, стамески, долота, зубила. Углеродистые инструментальные стали имеют низкую прокаливаемость и сильное смягчение при разогреве режущей кромки более 200 °С, что ограничивает их использование. Низкая прокаливаемость не позволяет изготавливать инструмент сечением более 20–25 мм.

Углеродистые стали применяются для изготовления режущего инструмента: фрезы, сверла, резцы и т. д. Режущая кромка инструмента должна обладать высокой твердостью (≥ 60 HRC) и износостойкостью. Эти свойства имеют высокоуглеродистые стали после термической обработки, закалки с низким отпуском. Так, например, стали У7, У7А обладают большей вязкостью, чем стали, содержащие более 0,8 % С, и их используют для изготовления зубил, молотков, топоров, а также игольной проволоки и слесарно-монтажных инструментов. Стали У8, У8А, У9 применяют для изготовления инструментов для обработки дерева, для форм литья под давлением оловянно-свинцовистых сплавов, для калибров простой формы. Для штампов холодной штамповки используют стали У10, У11, У11А. Стали с высоким содержанием углерода (> 1 %) марок У13, У13А применяют для изготовления напильников, бритвенных ножей, лезвий, хирургических инструментов.

2.5.2.4. Углеродистые стали специального назначения

Строительные стали предназначены для изготовления мостов, ферм, труб газо- и нефтепроводов и других конструкций. Строительные конструкции, как правило, сварные, поэтому необходимым требованием к данным сталям является высокая свариваемость.

Свариваемость стали определяется углеродным эквивалентом, который зависит в основном от содержания углерода. Для обеспечения хорошей свариваемости содержание углерода в строительных сталях не должно превышать 0,18 %. В качестве строительных наиболее часто используются углеродистые стали обыкновенного качества Ст1, Ст2, Ст3, Ст5, по степени раскисления – спокойные, полуспокойные. Для конструкций неответственного назначения используют кипящие стали обыкновенного качества.

Строительные стали потребитель не подвергает термической обработке, поскольку их конечные свойства обеспечивают на металлургическом заводе. Эти стали поставляют в горячекатаном, реже в нормализованном состоянии. Для получения более высоких прочностных характеристик стали должны содержать повышенное количество Mn и Si, до 1–1,25 % каждого

элемента. Чем выше предел текучести, являющийся расчетной характеристикой конструкций, тем меньше сечение и, соответственно, масса конструкций.

Строительные низкоуглеродистые стали используют там, где требуется высокая жесткость конструкций. Их применяют для армирования железобетонных изделий. К недостаткам этих сталей относят низкую хладноустойчивость, характеристикой которой служит температура перехода из вязкого состояния в хрупкое. Эксплуатация конструкций в условиях Сибири и районах Крайнего Севера приводит к снижению их механических характеристик, что требует большой массы конструкций. Повышение прочности, хладноустойчивости и надежности при эксплуатации достигается легированием сталей.

Стали для глубокой вытяжки применяются для изготовления деталей из тонкого листа, что составляет до 50 % массы легковых автомобилей. Глубокая вытяжка применяется также для изделий легкой пищевой промышленности: консервные банки, крышки, эмалированная посуда и т. д.

Основным требованием, предъявляемым к тонколистовой стали для пищевой и автомобильной промышленности, является способность к глубокой вытяжке, что свойственно сталям с низким содержанием углерода. Малоуглеродистые стали должны иметь углерода 0,08–0,12 % (ГОСТ 9045–80). Превышение этого предела увеличит прочность, но понизит пластичность, столь необходимую для вытяжки. Содержание углерода ниже 0,06 % нежелательно, поскольку при этом увеличивается склонность стали к газонасыщению, повышению склонности к росту зерна. Сталь должна содержать 0,3–0,45 % марганца. Недостаток содержания марганца ухудшает условия горячей прокатки из-за образования трещин на боковых кромках, а повышенное его содержание снижает эффект кипения стали при выплавке.

Для глубокой, сложной вытяжки используют малопрочные, высокопластичные стали 05, 08, 10 всех видов раскисления. Их поставляют в виде тонкого холоднокатаного листа в соответствии с ГОСТ 9045–80. Широко применяют кипящие стали 05кп, 08кп, 10кп. Способность этих сталей хорошо штамповаться обусловлена низким содержанием углерода и почти полным отсутствием кремния. Кипящая сталь склонна к деформационному старению (упрочнению) из-за повышенной газонасыщенности. В связи с этим используют сталь, легированную ванадием или алюминием: 08Фкп, 08Юкп. Таким образом, стали типа 08кп, 08Юкп применяют для глубокой вытяжки. Перед штамповкой листы имеют $\sigma_{\text{в}} = 260\text{--}360$ МПа, $\delta = 42\text{--}50$ %, $\text{HRB} \leq 46$ и отношение $\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}} = 0,6$. Чем ниже это отношение, тем пластичнее материал, а при $\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}} > 0,75$ штампуемость ухудшается.

Автоматные стали предназначены для изготовления деталей обработкой резанием. С улучшением обрабатываемости резанием растет производительность обработки деталей и изделий. Характеристиками обрабатываемости являются: максимально допустимая скорость и усилие резания, чистота поверхности резания, форма стружки и т. д. Обрабатываемость материала зависит от механических свойств, теплопроводности, структуры и хи-

мического состава. Трудно обрабатывать мягкие стали из-за налипания их на инструмент, из-за трудноломающейся длинной стружки, однако значительное повышение твердости стали способствует снижению обрабатываемости. Крупнокристаллический материал имеет пониженную вязкость, но лучше режется, так как создается «обработочная хрупкость», стружка измельчается и ломается. При различных операциях обработки (шлифование, точение, фрезерование, сверление и т. д.) обрабатываемость одного и того же материала бывает различной.

Повышение обрабатываемости резанием достигается технологическими и металлургическими приемами. Более эффективны металлургические приемы, предусматривающие введение в конструкционную сталь серы, селена, свинца, фосфора. Эти добавки и образуемые ими включения создают внутреннюю смазку, которая в зоне резания снижает трение между инструментом и стружкой, и облегчают ее измельчение. Сера способствует образованию вытянутых вдоль направления прокатки сульфидов марганца, которые оказывают смазывающее действие, нарушая при этом сплошность металла, т. е. образуя короткую и ломкую стружку. Свинец при содержании до 0,15–0,3 % не растворяется в стали и находится в виде мелких частиц, повышает обрабатываемость резанием при средних и пониженных скоростях резания (до 100 об/мин).

Стали с повышенным содержанием серы или дополнительно легированные указанными элементами относятся к автоматным сталям. В соответствии с ГОСТ 1414–75 эти стали маркируют буквой «А» (автоматная) и последующими цифрами, определяющими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Присутствие свинца обозначает буква «С», селена – буква «Е», остальные обозначения элементов соответствуют ГОСТ 4543–71.

Автоматные сернистые стали А12, А20, А40Г являются углеродистыми, содержат 0,08–0,3 % S и 0,05–0,15 % P, в стали А40Г увеличено количество марганца до 1,5 %. Автоматные стали АС14, АС40, АС35Г2, АС38ХГМ содержат свинец от 0,15 до 0,35 %. По обрабатываемости эти стали превосходят сернистые.

Повышенное количество серы и фосфора снижает качество стали. Автоматным сернистым сталям свойственна анизотропия механических свойств (пониженные вязкость, пластичность и сопротивление усталости в поперечном направлении прокатки). Невысокий уровень механических свойств и низкая коррозионная стойкость ограничивают применение автоматных сталей: они используются для изготовления неответственных деталей машин. Сернистые стали А12, А20 используют для изготовления крепежных деталей и малонагруженных изделий сложной формы, но с высокими требованиями по размерам и чистоте поверхности. Стали А30, А40Г предназначены для деталей, испытывающих более высокие напряжения. Свинцоводержащие стали АС40, АС45Г2 широко применяют на автомобильных заводах для изготовления деталей двигателей на станках-автоматах.

2.5.2.5. Легированные конструкционные стали

ГОСТ 4543–71 «Прокат из легированной конструкционной стали» распространяется на прокат горячекатаный и кованный толщиной до 250 мм, калиброванный из легированной конструкционной стали, применяемой в термически обработанном состоянии. В части норм химического состава стандарт распространяется на все другие виды проката, слитки, поковки и штамповки.

В зависимости от химического состава конструкционная сталь делится на категории: качественная, высококачественная – А, особовысококачественная – Ш. К особовысококачественной стали относятся стали электрошлакового переплава. В зависимости от основных легирующих элементов сталь делится на группы: хромистая, марганцовистая, хромомарганцевая, никельмолибденовая, хромомарганцевоникелевая и т. д. По состоянию материала прокат изготавливают без термической обработки, термически обработанный – Т, нагартованный – Н.



Рис. 2.26. Марка легированной конструкционной стали

Таблица 2.5

Массовая доля элементов, %, по ГОСТ 4543–71

Марка стали	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Другие элементы
20Х	0,17–0,23	0,17–0,37	0,50–0,80	0,70–1,0	–	–
18ХГТ	0,17–0,23	0,17–0,37	0,80–1,1	1,0–1,3	–	0,03–0,09Ti
40ХН	0,36–0,44	0,17–0,37	0,50–0,80	0,45–0,75	1,0–1,4	–
20ХН3А	0,17–0,24	0,17–0,37	0,30–0,60	0,60–0,90	2,75–3,15	–
38ХН2МА	0,33–0,40	0,17–0,37	0,25–0,50	1,30–1,70	1,3–1,7	0,2–0,3Mo

Таблица 2.6

Механические свойства проката после закалки и отпуска

Марка стали	Предел текучести, Н/мм ²	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение Ψ , %	Ударная вязкость KCU , Дж/см ²	Размер сечения заготовки, мм
20X	635	780	11	40	59	15
40X	785	980	10	45	59	25
40XC	1080	1230	12	40	34	25
40XH	785	980	11	45	69	25
20XH3A	735	930	12	55	108	15
40X2H2A	930	1080	12	50	78	25
38XM	885	980	11	45	69	25
18XГТ	885	980	9	50	78	–

Маркировка сталей содержит цифровые и буквенные обозначения: 15X, 45Г, 18XГТ, 40XC, 40XФА, 12XH3A, 20XH2M, 45XH2MФА. В обозначении марок первые две цифры указывают среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента. Буквы за цифрами означают: P – бор, Ю – алюминий, C – кремний, T – титан, Ф – ванадий, X – хром, Г – марганец, H – никель, M – молибден, B – вольфрам. Цифры, стоящие после букв, указывают примерную массовую долю легирующего элемента в целых единицах процентов. Отсутствие цифры означает, что в марке содержится до 1,5 % этого легирующего элемента. Буква «А» в конце наименования марки означает «высококачественная сталь» (рис. 2.26). Особовысококачественная сталь обозначается буквой «Ш» через тире в конце наименования марки. Например, качественная сталь – 30XГC, высококачественная – 30XГCA, особовысококачественная – 30XГC–Ш.

Химический состав легированных конструкционных сталей приведен в табл. 2.5.

Механические свойства проката, определяемые на образцах, изготовленных из термически обработанных заготовок по ГОСТ 4543–71, должны соответствовать нормам, указанным в табл. 2.6.

2.5.2.6. Литейные стали

Стальные отливки в общем объеме производства занимают незначительное место, однако по абсолютному количеству их много. Это объясняется тем, что для получения изделий сложной формы литейный способ производства более прост и дешевле по сравнению с обработкой металлов давлением. Стальное литье, выполненное без литейных дефектов по механическим свойствам, может не уступать кованным изделиям. Стальные фасон-

ные отливки получают путем литья в земляные, металлические формы или методами точного литья.

Для изготовления отливок предусмотрены следующие марки стали (ГОСТ 977–88 «Отливки стальные»): конструкционные нелегированные – 15Л, 20Л, 35Л; конструкционные легированные – 20ГЛ, 30ГСЛ, 45ФЛ, 35НГМЛ, 27Х5ГСМЛ, 03Н12Х5М3ТЮЛ; легированные со специальными свойствами – 20Х13Л, 09Х17Н3СЛ, 12Х18Н12М3ТЛ (коррозионно-стойкие); 20Х5МЛ, 40Х9С2Л, 45Х17Г13Н3ЮЛ (жаростойкие); 20Х12ВНМФЛ, 08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ (жаропрочные); 85Х4М5Ф2В6Л, (Р6М5Л), 90Х4М4Ф2В6Л (быстрорежущие); 110Г13Л, 110Г13ФТЛ, 120Г10ФЛ (износостойкие).

Маркируют литейные углеродистые стали цифрами, определяющими среднее содержание углерода в сотых долях процента, с добавлением буквы «Л» в конце марки: 15Л, 20Л, 40Л, 50Л (рис. 2.27).

Литейные углеродистые стали содержат углерод от 0,12 до 0,55 %. В их состав входят примеси: до 0,9 % Mn, до 0,52 % Si, менее 0,06 % S и 0,08 % P.

Литейные свойства углеродистых сталей хуже, чем литейные свойства чугунов и цветных литейных сплавов. Стали обладают низкой жидкотекучестью и склонны к образованию горячих литейных трещин. У сталей высокая температура плавления и очень большая линейная усадка (до 2,3 %).



Рис. 2.27. Марка литейной стали

Таблица 2.7

Механические свойства конструкционных нелегированных литейных сталей

Марка стали	Категория прочности	Вид термической обработки	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение Ψ , %	Ударная вязкость KCU , кДж/м ²
20Л	К20	Н*	216	412	22	35	491
30Л	К25	Н	255	471	17	30	343
35Л	К25	Н	275	491	15	25	343
50Л	К30	Н	334	569	11	20	245
30Л	КТ30	З*	294	491	22	33	343
50Л	КТ40	З	392	736	14	20	294

Примечание. Н* – нормализация или нормализация с отпуском, З* – закалка и отпуск.

Литая углеродистая сталь имеет низкие прочностные свойства из-за образования при затвердевании отливок крупнозернистой структуры. Для повышения пластичности и ударной вязкости стальные отливки можно подвергать улучшению (закалка с высоким отпуском) или нормализации. Прочностные свойства литейных сталей увеличиваются с повышением содержания углерода, однако это приводит к снижению относительного удлинения и ударной вязкости. Механические свойства стальных отливок в зависимости от категории прочности и термической обработки приведены в [табл. 2.7](#).

Производство стальных фасонных отливок широко используется в железнодорожной, транспортной, тяжелой, автотракторной и других отраслях машиностроения. Углеродистая сталь марок 15Л, 20Л, 30Л, 35Л используется для литья тормозных дисков, шестерен, корпусов и других деталей, работающих при средних удельных давлениях. Стали с повышенным содержанием углерода 50Л, 55Л применяются для износостойких деталей, не испытывающих ударных нагрузок. Низкоуглеродистые литейные стали применяются для изготовления деталей, подвергающихся ударным нагрузкам, арматуры, узлов сварно-литейных конструкций. Среднеуглеродистые стали используются для изготовления крупных шестерен, зубчатых колес и станин, валов токарных станков.

2.5.3. Чугуны

Чугуны относятся к материалам с высокими литейными свойствами и являются наиболее распространенными сплавами для фасонного литья. У чугунов более низкая, чем у сталей, температура плавления, высокая жидкотекучесть, малая усадка, высокое сопротивление образованию усадочных трещин, что и позволяет отливать детали сложной формы.

Промышленные чугуны содержат 2,0–4,5 % С, 1,0–3,5 % Si, 0,5–1,0 % Mn, до 0,3 % P и до 0,2 % S. Содержание кремния в чугунах соизмеримо с содержанием углерода, поэтому кремний является не примесью, а легирующим элементом чугуна.

В зависимости от назначения чугуны подразделяются на чугуны общего и специального применения. К чугунам общего назначения относятся: серые, высокопрочные, ковкие и чугуны с вермикулярным графитом. Чугуны специального назначения: легированные, антифрикционные чугуны. При легировании повышаются механические и специальные свойства чугунов. Легированные чугуны применяют в качестве износостойких, коррозионно-стойких, жаропрочных, жаростойких материалов.

2.5.3.1. Серые чугуны

Серые чугуны – это основная группа литейных материалов. Принадлежность чугуна к серому чугуну определяется пластинчатой формой графита ([рис. 2.28, а](#)). По ГОСТ 1412–85 «Чугун с пластинчатым графитом

для отливок» определяются марки, механические свойства и химический состав серых чугунов. Для изготовления отливок предусматриваются следующие марки чугуна: СЧ 10, СЧ 15, СЧ 18, СЧ 20, СЧ 21, СЧ 24, СЧ 25, СЧ 30, СЧ 35. Условное обозначение марки (рис. 2.29) включает буквы «СЧ» – серый чугун и цифровое обозначение величины минимального временного сопротивления при растяжении ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$). Например, чугун СЧ 10 имеет временное сопротивление при растяжении не менее 100 МПа. Чугун СЧ 10 имеет ферритную, а чугун СЧ 35 – перлитную основу.

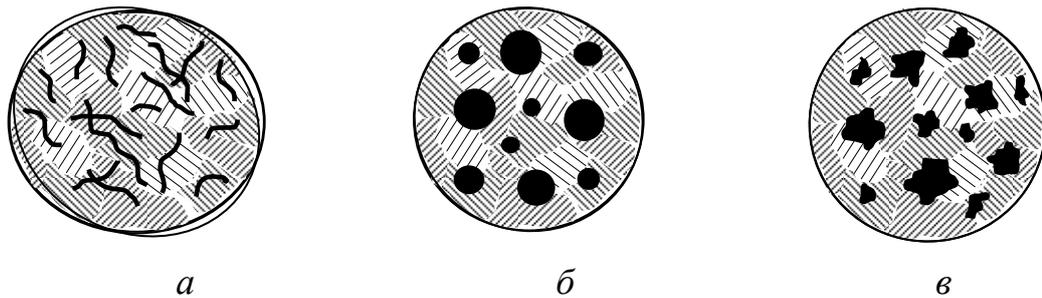


Рис. 2.28. Структура чугунов с перлитной металлической основой:
а – серого; б – высокопрочного; в – ковкого

Таблица 2.8

Ориентировочные данные о временном сопротивлении при растяжении в отливках разного сечения

Марка чугуна	Толщина стенки, мм		
	8	50	150
	Временное сопротивление разрыву при растяжении, МПа, не менее		
СЧ 10	120	75	65
СЧ 25	270	180	150
СЧ 35	380	260	205

СЧ 25

Временное сопротивление разрыву при растяжении 250 МПа

Серый чугун /Н

Рис. 2.29. Марка серого чугуна

Механические свойства чугуна зависят от толщины стенки отливки: с увеличением толщины стенки отливки уменьшается прочность и твердость серого чугуна (табл. 2.8).

По действующему стандарту серые чугуны в зависимости от марки содержат углерода 2,9–3,7 %, кремния 1,2–2,6 %, марганца 0,5–1,1 %, фосфора до 0,3 % и серы до 0,15 %. Сера снижает прочность чугуна и поэтому является вредной примесью. Фосфор повышает жидкотекучесть чугуна, но может снижать прочность и ударную вязкость.

Основные области применения серого чугуна – станкостроение и тяжелое машиностроение, автомобильная промышленность и сельскохозяйственное машиностроение. Из чугуна изготавливают станины станков, корпусные детали, картеры, шкивы, крышки, санитарно-техническое оборудование.

2.5.3.2. Высокопрочные чугуны

При модифицировании чугуна 0,05 % магния или церия графит кристаллизуется в шаровидной форме. Чугуны с шаровидным графитом называют *высокопрочными*. По ГОСТ 7293–85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок» высокопрочные чугуны маркируются следующим образом: ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100. Обозначение марки включает буквы «ВЧ» – высокопрочный чугун и цифровое обозначение величины минимального временного сопротивления разрыву при растяжении (МПа · 10⁻¹). Например, чугун ВЧ 100 ([табл. 2.9](#)) имеет временное сопротивление разрыву при растяжении не менее 1000 МПа.

Таблица 2.9

Механические свойства чугуна с шаровидным графитом для отливок по ГОСТ 7293–85

Марка чугуна	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	δ , %	Твердость, НВ
ВЧ 35	350 (35)	220 (22)	22	140–170
ВЧ 45	450 (45)	310 (31)	10	140–225
ВЧ 60	600 (60)	370 (37)	3	192–277
ВЧ 80	800 (80)	480 (48)	2	218–351
ВЧ 100	1000 (100)	700 (70)	2	270–360

Чугуны ВЧ 35 и ВЧ 40 имеют ферритную, ВЧ 45 и ВЧ 50 – перлито-ферритную, ВЧ 60, ВЧ 70 и ВЧ 80 – перлитную металлическую основу ([рис. 2.28, б](#)).

В отличие от серых чугунов с пластинчатым графитом во всех высокопрочных чугунах содержание углерода практически одинаково высокое, что обеспечивает хорошие литейные свойства. Примесь фосфора снижает пластичность, поэтому его содержание не должно превышать 0,1 %. Особенно вредна сера: она снижает механические свойства и ослабляет действие модификаторов. Содержание серы не должно превышать 0,02–0,01 %, это меньше допуска в качественных сталях.

Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом используют для замены литой стали в изделиях ответственного назначения: валки горячей прокатки, станины и рамы прокатных станов, молотов, прессов, коленчатые валы дизельных двигателей. Высокопрочный чугун применяют и для замены серого чугуна, если необходимо увеличить срок службы изделия или снизить его массу.

Чугун с вермикулярным графитом по свойствам и внутреннему строению занимает промежуточное положение между серым и высокопрочным чугуном. Графит вермикулярной формы представляет переходную форму от пластинчатой к шаровидной. В чугуне с вермикулярным графитом может содержаться не более 40 % шаровидного графита. Для изготовления отливок применяются чугуны следующих марок: ЧВГ 30, ЧВГ 35, ЧВГ 40, ЧВГ 45. Обозначение марки включает буквы «ЧВГ» – чугун с вермикулярным графитом и цифровое обозначение минимального значения временного сопротивления разрыву при растяжении ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$).

Чугуны марок ЧВГ прочнее, а при одинаковой прочности пластичнее чугунов марок СЧ. Они превосходят чугуны марок ВЧ по демпфирующей способности и обрабатываемости резанием. Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом для отливок приведены в [табл. 2.10](#).

Таблица 2.10

Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом по ГОСТ 28394–89

Марка чугуна	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	δ , %	Твердость, НВ
ЧВГ 30	300 (30)	240 (24)	3,0	130–180
ЧВГ 35	350 (35)	260 (26)	2,0	140–190
ЧВГ 40	400 (40)	320 (32)	1,5	170–220
ЧВГ 45	450 (45)	380 (38)	0,8	190–250

Чугуны с вермикулярным графитом применяют вместо серых чугунов для отливок базовых деталей станков и кузнечно-прессового оборудования, массивных изложниц, кокильной оснастки.

2.5.3.3. Ковкие чугуны

Ковкий чугун получают отжигом белого чугуна. При отжиге белого чугуна образуется графит в благоприятной для механических свойств компактной, хлопьевидной форме. Относительное удлинение ковкого чугуна может достигать гарантированного уровня 10–12 %, у исходного белого

чугуна не превышает 0,2 %, а у чугуна с пластинчатым графитом – 1 %. Механические свойства ковких чугунов приведены в [табл. 2.11](#).

Таблица 2.11

Механические свойства ковкого чугуна по ГОСТ 1215–79

Марка чугуна	Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/мм ²), не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Твердость, НВ
КЧ 30–6	294 (30)	6	100–163
КЧ 37–12	362 (37)	12	110–163
КЧ 45–7	441 (45)	7	150–207
КЧ 60–3	588 (60)	3	200–269
КЧ 80–1,5	784 (80)	1,5	270–320

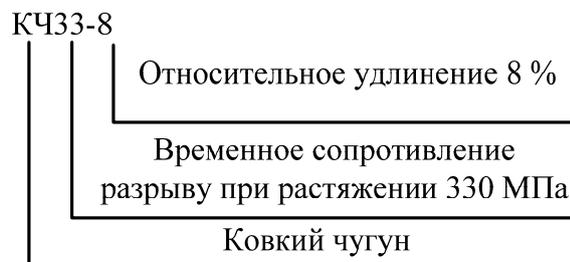


Рис. 2.30. Марка ковкого чугуна

Белый чугун, предназначенный для отжига на ковкий, содержит 2,4–2,9 % С, 1,0–1,6 % Si, 0,3–1,0 % Mn, не более 0,18 % Р и 0,20 % S. Содержание углерода и кремния в ковком чугуне должно быть меньше, чем в сером. В таком случае при кристаллизации обеспечивается формирование структуры белого чугуна по всему сечению отливки.

В соответствии с ГОСТ 1215–79 отливки из ковкого чугуна изготавливают следующих марок: КЧ 30–6, КЧ 33–8, КЧ 35–10, КЧ 37–12 ферритного класса с ферритной или ферритно-перлитной металлической основой; КЧ 45–7, КЧ 50–5, КЧ 55–4, КЧ 60–3, КЧ 65–3, КЧ 70–2, КЧ80–1,5 перлитного класса ([рис. 2.28, в](#)). Обозначение марки включает буквы «КЧ» – ковкий чугун и цифровые обозначения величины минимального временного сопротивления разрыву при растяжении (кгс/мм²) и величины минимального относительного удлинения в процентах ([рис. 2.30](#)).

2.5.3.4. Антифрикционные чугуны

Антифрикционные чугуны применяют для работы в узлах трения со смазкой, подшипников скольжения, втулок, вкладышей. По ГОСТ 1585–85

«Антифрикционные чугуны» в качестве антифрикционных используют серые чугуны с пластинчатым графитом АЧС-1, АЧС-2, ..., АЧС-6, высокопрочные чугуны с шаровидным графитом АЧВ-1, АЧВ-2 и ковкие чугуны АЧК-1, АЧК-2. В обозначении марки цифра означает порядковый номер, от которого зависит химический состав чугуна.

2.5.3.5. Легированные чугуны

Чугуны, легированные углеродом, хромом, кремнием, алюминием, никелем, медью и другими элементами, относятся к чугунам со специальными свойствами: износостойкие, жаростойкие, жаропрочные и коррозионно-стойкие.

По действующему стандарту регламентируются механические свойства легированных чугунов, которые приведены в [табл. 2.12](#).

По ГОСТ 7769–82 «Чугун легированный для отливок со специальными свойствами» чугун подразделяется на виды и марки по легированию и по назначению. К хромистым чугунам относятся чугуны марок ЧХ1, ЧХ3, ЧХ16, ЧХ22С, ЧХ28Д2; к кремнистым – ЧС5, ЧС17, ЧС15М4; к алюминиевым – ЧЮ6С5, ЧЮ22Ш; к марганцевым – ЧГ6С3Ш, ЧГ8Д3; к никелевым – ЧНХТ, ЧН2Х2, ЧН19Х3Ш. В обозначении марок чугуна первая буква «Ч» – чугун, последующие буквы определяют легирующие элементы: Х – хром, С – кремний, Г – марганец, Н – никель, Д – медь, М – молибден, Т – титан, П – фосфор, Ю – алюминий; буква Ш указывает на шаровидную форму графита. Цифры, стоящие после каждой буквы, означают примерную массовую долю основных легирующих элементов в процентах.

Таблица 2.12

Механические и эксплуатационные свойства чугунов

Марка чугуна	Временное сопротивление, МПа, не менее		Твердость, НВ	Эксплуатационные свойства
	растяжению	изгибу		
ЧХ3	150	310	228–364	Жаростойкий до 973 К, износостойкий
ЧХ32	290	460	245–340	Жаростойкий до 1423 К, износостойкий
ЧС15М4	60	140	390–450	Коррозионно-стойкий в кислотах, щелочах, солях
ЧХ22С	290	540	215–340	Коррозионно-стойкий в газовых средах до 1273 К
ЧЮХШ	390	590	187–364	Жаростойкий до 923 К
ЧХ9Н5	350	700	490–610	Износостойкий
ЧГ8Д3	150	330	176–285	Магнитный, износостойкий

Отливки из легированных чугунов используются в условиях повышенных температур, в агрессивных средах, при значительном трении изделий. Хромистые чугуны ЧХ1, ЧХ2, ЧХ3, относящиеся к жаростойким и износостойким, применяются для изготовления деталей термических печей, колосников, горелок, кокилей. Кремнистые чугуны с высокой коррозионной стойкостью и износостойкостью ЧС5, ЧС15М4, ЧС15 используются для изготовления топочной арматуры котлов, деталей компрессоров, теплообменников и деталей химической аппаратуры. Марганцевые чугуны, относящиеся к износостойким и маломангнитным ЧГ7Х4, ЧГ8Д3, применяют для деталей насосов, мельниц, дробе- и пескоструйных камер, немагнитных деталей арматуры.

2.5.4. Инструментальные материалы

По ГОСТ 5950–73 «Прутки и полосы из инструментальной легированной стали» металлопродукцию по назначению подразделяют на две группы: для изготовления инструмента, используемого для обработки металлов и других материалов в холодном состоянии и для обработки металлов давлением при температуре выше 300 °С. Данный стандарт распространяется на горячекатаные, кованые, калиброванные прутки и полосы из легированной инструментальной стали.

В первую группу входят высоко- и среднеуглеродистые легированные стали следующих марок: 9ХФ, 13Х, ХВ4, Х, 9ХС, ХВГ, Х12, Х12ВМФ, 6Х4М2ФС, 8ХЧВ2МФС2. Вторую группу в основном составляют среднеуглеродистые легированные стали следующих марок: 5ХНМ, 5ХНВ, 4ХМФС, 4Х2В5МФ, 6Х3МФС. В обозначении марок инструментальных сталей первые цифры определяют массовую долю углерода в десятых долях процента. Цифры отсутствуют, если массовая доля углерода близка к единице или больше единицы. Например: сталь 9ХФ содержит 0,8–0,9 % С, 0,15–0,30 % V, 0,15–0,35 % Si, 0,30–0,60 % Mn, 0,40–0,70 % Cr; сталь 4Х5МФС содержит 0,32–0,40 % С, 0,9–1,2 % Si, 0,20–0,50 % Mn, 4,5–5,5 % Cr, 0,30–0,50 % V, 1,2–1,5 % Mo.

Быстрорежущие стали. Высоколегированные стали, предназначенные для изготовления инструментов высокой производительности, относятся к группе быстрорежущих сталей (табл. 2.13). Основное свойство этих сталей – высокая теплостойкость, которая обеспечивается введением большого количества вольфрама совместно с другими карбидообразующими элементами – молибденом, хромом, ванадием.

Вольфрам и молибден в присутствии хрома связывают углерод в специальный труднокоагулируемый при отпуске карбид типа Me_6C (Me – условное обозначение металла) и задерживают распад мартенсита. Выделение дисперсных карбидов, которое происходит при повышенных температурах отпуска (500–600 °С), вызывает дисперсионное твердение мартенсита – явление вторичной твердости (рис. 2.31).

Таблица 2.13

Состав быстрорежущих сталей, %

Марка стали	C	Cr	W	V	Mo	Co
P18	0,7–0,8	3,8–4,4	7,0–18,5	1,0–1,4	1,0	–
P6M5	0,80–0,88	3,8–4,4	5,5–6,5	1,7–2,1	5,0–5,5	–
P14Ф4	1,2–1,3	4,0–4,6	13,0–14,5	3,4–4,4	1,0	–
P10K5Ф5	1,45–1,55	4,0–4,6	10,0–11,5	4,3–5,1	1,0	5,0–6,0



Рис. 2.31. Марка быстрорежущей инструментальной стали

Твердые сплавы получают из порошков карбидов вольфрама (WC), карбидов титана (TiC) и карбидов тантала (TaC), смешанных с порошком кобальта (Co). Твердые сплавы применяют в виде пластинок определенной формы и размеров, изготавливаемых методом порошковой металлургии. Пластины предварительно прессуют, а затем спекают при температуре 1500–1900 °С.

Различают твердые сплавы: вольфрамовые – BK2, BK3, BK3M, BK4B, BK6M, BK6, BK6B, BK8, BK8B, BK10, BK15, BK20, BK25; титано-вольфрамовые – T30K4, T15K6, T14K8, T5K10, T5K12B; титанотантало-вольфрамовые – TT7K12, TT10K8B. Пластины твердого сплава (HRA 86–92) обладают высокой износостойкостью и красностойкостью (800–1000 °С), что позволяет вести обработку со скоростями резания до 800 м/мин. Пластины припаивают к державкам или корпусам инструментов медными (латунными) припоями или крепят механическим способом.

В промышленности применяют многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины (трех-, четырех-, пяти- и шестигранные и др.), которые крепят механическим способом. После износа одной из режущих кромок пластины в работу вводят следующую. Недостатком твердых сплавов является пониженная пластичность.

Твердые сплавы группы BK используют для обработки деталей из хрупких металлов, пластмасс, неметаллических материалов, а сплавы группы ТВК – для обработки деталей из пластических и вязких металлов и сплавов.

Мелкозернистые твердые сплавы (ВК6М и др.) применяют для обработки деталей из труднообрабатываемых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, твердых чугунов, бронз, закаленных сталей, сплавов легких металлов, сплавов титана, фосфора, керамики, стекла, ферритов. Трехкарбидные сплавы ТТК отличаются от сплавов групп ВК и ТВК повышенной износостойкостью, прочностью и вязкостью, их применяют для обработки труднообрабатываемых сталей аустенитного класса.

2.5.5. Цветные металлы и их сплавы

2.5.5.1. Алюминиевые сплавы

Алюминий – легкий металл с плотностью 2700 кг/м^3 , обладает высокими теплопроводностью и электропроводимостью, стоек к коррозии. Температура плавления алюминия – $658 \text{ }^\circ\text{C}$.

Алюминиевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Те и другие могут быть не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются прокаткой, ковкой, штамповкой. К деформируемым алюминиевым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al–Mn (АМц), содержащие до 1,6 % Mn, и сплавы системы Al–Mg (АМг), содержащие до 5,8 % Mg. Эти сплавы обладают высокой пластичностью и невысокой прочностью.

К деформируемым алюминиевым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al–Cu–Mg (дуралюмины, ковочные сплавы), а также высокопрочные и жаропрочные сплавы сложного химического состава. Дуралюмины (Д16–Д18) содержат 3,8–4,8 % Cu, 0,4–1,8 % Mg, а также 0,4–0,9 % Mn, который повышает коррозионную стойкость сплавов. После термической обработки эти сплавы приобретают высокие прочность и пластичность. Ковочные сплавы (АК6–АК8) содержат 1,8–4,8 % Cu, 0,4–0,8 % Mg, 0,4–1 % Mn, 0,6–1,2 % Si, хорошо деформируются в нагретом состоянии, обладают высокой прочностью после термообработки.

Литейные алюминиевые сплавы применяют для изготовления деталей машин и приборов литьем. Наиболее широко используют сплавы алюминия с содержанием 10–13 % Si, например АК12 (АЛ2).

Сплавы алюминия с медью (до 5,3 % Cu) АМ5 (АЛ19) применяют для литья деталей, работающих при достаточно высоких нагрузках (кронштейны, арматура и др.).

Сплавы алюминия с магнием (до 9,5–11,5 % Mg) обладают хорошей коррозионной стойкостью и применяются для отливок, работающих во влажной атмосфере АМг10 (АЛ27) и АМг5К (АЛ13). Часто отливки из алюминиевых литейных сплавов подвергают термической обработке для повышения прочности, пластичности, снижения остаточных напряжений.

Алюминий применяют для приготовления спеченных алюминиевых сплавов (САС) и спекаемых алюминиевых пудр (САП), из которых изготавли-

ют детали методами порошковой металлургии, позволяющей получать детали с особыми свойствами: коррозионной стойкостью, прочностью, пористостью.

2.5.5.2. Магний и его сплавы

Магний – легкий металл с плотностью 1740 кг/м, температурой плавления 651 °С. Промышленный магний марки Мг96 содержит 99,96 % Mg, марки Мг95 – 99,85 % Mg. Магниевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные, не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые магниевые сплавы (МА) (ГОСТ 14957–76) содержат до 2 % Mn, до 5 % Al, десятые доли процента церия, например сплавы МА2, МА8, не упрочняемые термической обработкой; высокопрочные сплавы – до 9 % Al и 0,5 % Mn (сплав МА5). Жаропрочные магниевые сплавы содержат добавки циркония, никеля и др.

Литейные магниевые сплавы (МЛ6, МЛ3) (ГОСТ 2856–79) содержат 2,5–9 % Al и 0,5–1,5 % Zn, 0,15–0,5 % Mn, имеют невысокий модуль упругости ($E = 43\ 000$ МПа) и вследствие этого хорошие демпфирующие свойства (гасят колебания конструкции). Однако эти сплавы обладают невысокой коррозионной стойкостью, и для ее повышения отливки оксидируют, покрывают лаками.

2.5.5.3. Медь и ее сплавы

Медь – тяжелый цветной металл, имеет плотность 8940 кг/м³, температуру плавления 1083 °С, обладает высокой пластичностью, коррозионной стойкостью, малым удельным электросопротивлением, высокой теплопроводностью. Медь широко используют для изготовления электропроводов, деталей электрических машин и приборов, в химическом машиностроении.

Медь по чистоте подразделяют на марки М0 (99,97 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu), М4 (99 % Cu).

Медные сплавы разделяют на бронзы и латуни. *Бронзы* (ГОСТ 493–79, 613–79) – это сплавы меди с оловом (4–33 % Sn), свинцом (30 % Pb), алюминием (5–11 % Al), кремнием (4–5 % Si), сурьмой и фосфором. *Латуни* – это сплавы меди с цинком (до 50 % Zn) с небольшими добавками алюминия, кремния, никеля, марганца (ГОСТ 17711–93, 15527–70). Медные сплавы обозначают начальными буквами их названия (Л – латунь, Бр – бронза), после чего следуют первые буквы основных названий элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество легирующего элемента в процентах. Например, ЛЦ40Мц1,5 – латунь, содержащая 40 % Zn, 1,5 % Mn, остальное – Cu.

Бронзы и латуни разделяют на деформируемые и литейные. Литейные бронзы и латуни отличаются от деформируемых тем, что в их состав вводят добавки, улучшающие литейные свойства сплава: повышающие жидкотекучесть.

честь, уменьшающие усадку. Однако эти добавки снижают пластические свойства литейных бронз и латуней по сравнению с деформируемыми.

2.5.5.4. Титан и его сплавы

Титан – тугоплавкий металл с температурой плавления 1665 °С, плотностью 4500 кг/м³. Временное сопротивление разрыву чистого титана $\sigma_b = 250$ МПа, относительное удлинение $\delta = 70$ %; он обладает высокой коррозионной стойкостью. Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструкционных сталей. Поэтому при замене сталей титановыми сплавами можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40 %. Однако титан имеет низкую жаростойкость, так как при температурах выше 500–600 °С легко окисляется и поглощает водород. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него изготавливают сложные отливки, но его обработка резанием затруднительна.

Для получения сплавов с заданными свойствами титан легируют (ГОСТ 19807–91) алюминием, молибденом и др. Наибольшее применение нашли сплавы, легированные алюминием, например сплав ВТ 5 (до 5 % Al) с $\sigma_b = 700$ –900 МПа, $\delta = 10$ –12 %. Из этого сплава получают поковки, отливки.

Для получения требуемых механических свойств титановые сплавы подвергают термической обработке (отжигу, закалке и старению) в печах с защитной атмосферой. Титан и его сплавы используют для изготовления деталей самолетов, в химическом машиностроении, судостроении и других областях машиностроения.

2.6. Классификация неметаллических материалов

2.6.1. Строение и виды полимеров

Строение полимеров. *Полимерами* называются вещества с большой молекулярной массой ($> 10^4$), у которых молекулы состоят из одинаковых групп атомов – звеньев ([рис. 2.32](#)). Каждое звено представляет собой измененную молекулу исходного низкомолекулярного вещества – мономера.

В зависимости от характера связей между линейными молекулами различают термопластичные и терморезистивные полимеры. Первые способны многократно размягчаться при нагреве и твердеть при охлаждении без изменения своих свойств, вторые при нагреве остаются твердыми вплоть до полного термического разложения.

Это различие в поведении при нагреве объясняется тем, что у термопластичных полимеров между молекулами действуют относительно слабые силы Ван-дер-Ваальса. При нагреве связи между молекулами значительно ослабляются, материал становится мягким и податливым. У терморезистивных полимеров кроме сил Ван-дер-Ваальса имеются поперечные ковалентные связи между молекулами. Благодаря им терморезистивный материал

остаётся твердым при нагреве.

Линейные молекулы имеют главные цепи и боковые группы (рис. 2.32). При молекулярной массе 10^4 – 10^6 в линейной молекуле объединяются сотни звеньев и длина главной цепи во много раз больше размеров боковых групп. Боковые группы образуют атомы (водород, галоиды), радикалы (ОН–, CN–, C_6H_5 – и др.), короткие полимерные цепи из нескольких звеньев. Очевидно, что при наличии боковых групп нескольких видов имеются возможности разместить их вдоль главной цепи как неупорядоченно, так и в определенном порядке. Полимеры с неупорядоченным чередованием групп называются *нерегулярными*, с упорядоченным – *регулярными*.

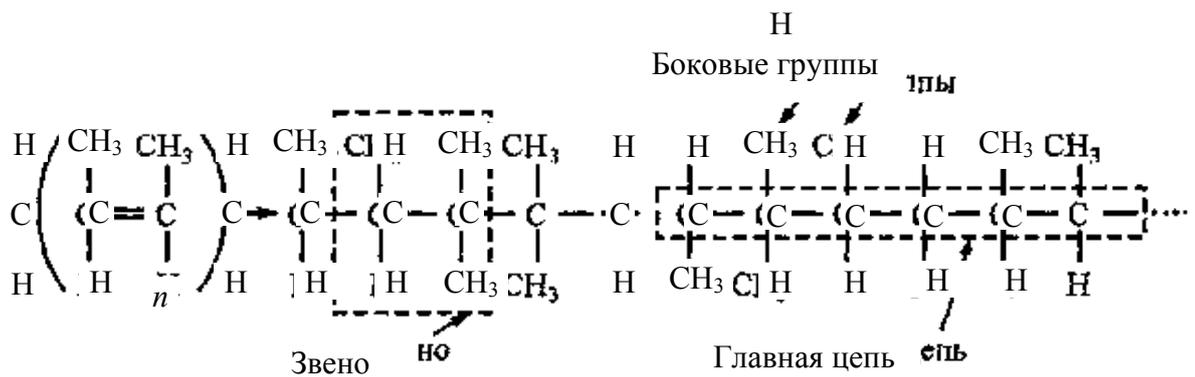


Рис. 2.32. Схема строения линейной макромолекулы

Структура молекул определяется способом производства полимера. При обработке полимеров (нагрев, растворение и т. д.) структура молекул почти не изменяется, и нельзя, например, нерегулярный полимер сделать регулярным. Общая структура полимеров складывается из структуры молекул и надмолекулярной структуры, т. е. взаимной укладки линейных молекул в полимерном веществе. Надмолекулярная структура появляется под влиянием сил притяжения между молекулами и теплового движения самих молекул. Для нерегулярных полимеров характерны пачечные структуры, когда на сравнительно больших участках главные цепи соседних молекул располагаются параллельно. У регулярных полимеров типичными надмолекулярными структурами являются кристаллы.

Макромолекулы в полимерном веществе упакованы не плотно, и мерой плотности упаковки является так называемый *свободный объем*, т. е. разность между фактическим удельным объемом вещества и теоретическим удельным объемом при самой плотной упаковке. При нагреве свободный объем увеличивается. В зависимости от свободного объема полимерное вещество находится в одном из физических состояний: стеклообразном, высокоэластичном, вязкотекучем. Переходы из одного состояния в другое происходят без выделения или поглощения теплоты. Температуры переходов называются *температурами стеклования* $t_{ст}$ и *текучести* $t_{тек}$.

Виды полимеров. *Полиэтилен* – один из наиболее широко применяемых полимеров. Выпускают полиэтилены высокого давления (ПЭВД) и низкого давления (ПЭНД). Прочность, теплостойкость и химическая стойкость ПЭНД выше, чем ПЭВД. Последний обладает хорошей газонепроницаемостью.

Полипропилен хорошо выдерживает изгиб, обладает высокой износостойкостью, устойчив к действию легких кислот и щелочей.

Полистирол – хрупкий полимер, обладающий высокой радиационной стойкостью, легко подвергающийся старению. Промышленностью выпускают полистирол обычный (марки ПСМСМ и ПСМ), суспензионный (ПС-С, ПС-СП) и эмульсионный (ПСЭ-1, ПСЭ-2). Предел прочности составляет 35–45 МПа.

Политетрафторэтилен – линейный полимер, превосходный диэлектрик, устойчив к окислителям, щелочам, кислотам, органическим растворителям. В России выпускается под маркой «фторопласт-4», имеющей низкий коэффициент трения.

Полиметиленоксид – линейный полимер, хорошо сопротивляется усталостным и динамическим знакопеременным нагрузкам, обладает низкой ползучестью, высокой износостойкостью.

Полифениленсульфид характеризуется высокой термостойкостью, устойчивостью к окислению, радиационной стойкостью.

Полифениленоксид – простой ароматический полиэфир линейного строения. Полимер нетоксичен, стоек к агрессивным средам, грибковой плесени.

Полиэтилентерефталат – сложный линейный ароматический полиэфир терефталевой кислоты. Для изделий, изготовленных из него, характерна стабильность формы.

Поликарбонаты – сложные полиэфиры. В России выпускаются под маркой «дифлон». Полимер устойчив к действию ультрафиолетового излучения, обладает низкой стойкостью к действиям микроорганизмов.

Полиарилаты – сложные ароматические полиэфиры, обладают высокой прочностью и термостойкостью.

Полиоксибензоаты характеризуются высокой термостойкостью, не плавятся вплоть до температуры разложения 550 °С.

Полиимиды выпускаются в виде пресс-порошков марок ПМ-67, ПМ-69. Для изделий, изготовленных из полиимидов, характерны высокая стабильность размеров, низкая ползучесть при высоких температурах, высокая термостойкость.

Полиамиды в нашей стране хорошо известны под маркой «нейлон-7». Для них характерна высокая износостойкость, ударная вязкость, устойчивость к действию органических растворителей.

Эпоксидная смола представляет собой олигомеры или полимеры, содержащие в молекуле не менее двух эпоксидных групп. Отвердителями смол служат многомерные, олигомерные и полимерные соединения

различных классов. Смолы обладают высокой стойкостью к действию щелочей, солей, окислителей, органических растворителей. Полимерные конструкционные материалы (ПКМ), изготовленные на основе эпоксидных смол, обладают высокими механическими свойствами.

Фенолформальдегидные смолы – полимеры, представляют собой продукты поликонденсации фенола с формальдегидами. В зависимости от условий поликонденсации образуются термореактивные или термопластичные смолы. Большинство из них устойчивы к действию кислот.

Фурановые смолы представляют собой олигомерные продукты, содержащие в молекулах фурановые цепи и способные превращаться в присутствии катализатора или при нагревании в трехмерные полимеры. Промышленно выпускаются смолы марок ФА, ФЛ, ФАЭД. Отверждение происходит с участием специальных реагентов (пироксидов, кислот, солей, эпоксидов и др.) или под действием тепла, излучений высокой энергии и др.

Кремнийорганические полимеры представляют собой термостойкие, высокомолекулярные, элементоорганические соединения, содержащие в составе элементарного звена макромолекулы атомы кремния и углерода. Промышленно выпускаются кремнийорганические смолы К-41, К-44 и др. Устойчивы к действию большинства кислот и щелочей.

2.6.2. Строение стекла

Стекло – твердый аморфный прозрачный в той или иной области оптического диапазона (в зависимости от состава) материал, полученный при переохлаждении расплава, содержащего стеклообразующие компоненты (оксиды Si, B, Al, P и т. д.) и оксиды металлов (Li, K, Mg, Pb и т. д.).

Основу стекла образует объемная сетка из однородных структурных элементов. В наиболее простом по составу кварцевом стекле такими элементами являются тетраэдры $[\text{SiO}_4]$, которые соединяются своими вершинами (рис. 2.33). Из таких же тетраэдров образована структура кристаллического кварца. Различие между двумя веществами одинакового химического состава объясняется размещением $[\text{SiO}_4]$: углы между связями Si–O в кварцевом стекле характеризуются более широкими пределами ($120\text{--}180^\circ$), чем углы в кристаллическом кварце. Структура аморфного стекла возникает при охлаждении стеклянной массы, когда повышение ее вязкости препятствует кристаллизации.

Основную массу промышленных стекол составляют силикатные стекла с добавками других оксидов. По сравнению с кварцевым стеклом они размягчаются при более низких температурах и легче перерабатываются в изделия.

В силикатных стеклах атомы соединяются ковалентно-ионными связями; в объемную сетку кроме кремния и кислорода входят также алюминий, титан, германий, бериллий; ионы щелочных и щелочно-земельных металлов размещаются в ячейках стекол, что приводит к изменению их свойств, в том

числе цвета, и является причиной структурной неоднородности.

При охлаждении однофазный расплав расслаивается на две или несколько жидких фаз разного химического состава. Затвердевшее стекло имеет многофазную структуру. Расслоение силикатных стекол – характерная особенность их структуры.

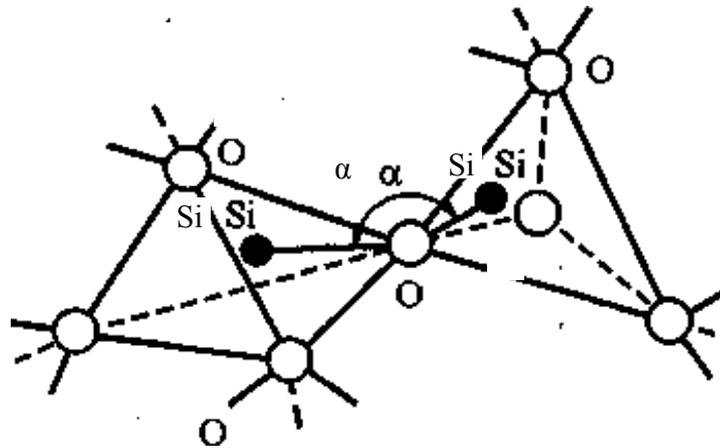


Рис. 2.33. Строение кварцевого стекла

При определенном соотношении содержания кремния, кислорода и других элементов очень трудно предупредить зарождение и рост кристаллов. Кристаллизация, или «расстекловывание», с образованием крупных кристаллов отрицательно влияет на прочность и прозрачность стекла. Кристаллизацию предупреждают подбором химического состава стекла и условий его варки. Напряжения в стеклянных изделиях из-за различной плотности в разных участках устраняют нагревом, достаточным для перестройки элементов структуры и выравнивания плотности. Из стекол специального состава при помощи контролируемой кристаллизации получают *ситаллы* – стеклокристаллические материалы. Структура ситаллов представляет собой смесь очень мелких (0,01–1 мкм), беспорядочно ориентированных кристаллов (60–95 %) и остаточного стекла (5–40 %). Исходное стекло по химическому составу отличается от остаточного стекла, в котором накапливаются ионы, не входящие в состав кристаллов. Такая структура создается в стеклянных изделиях после двойного отжига (первый нужен для формирования центров кристаллизации, второй – для выращивания кристаллов на готовых центрах). Для образования кристаллов в стеклах вводят Li_2O , TiO_2 , Al_2O_3 и другие соединения.

2.6.3. Строение керамики

Керамикой называются материалы, полученные при высокотемпературном спекании минеральных порошков. При нагреве исходные вещества взаимодействуют между собой, образуя кристаллическую и аморфную фазы. Керамика представляет собой пористый материал, содержащий ковалентные

или ионные кристаллы – сложные оксиды, карбиды или твердые растворы на их основе. Аморфная фаза является стеклом, которое по своему химическому составу отличается от кристаллов. Керамический материал содержит одну или несколько кристаллических фаз; отдельные виды керамики совсем не имеют стекла в своей структуре. Как правило, керамика имеет поликристаллическую структуру с прослойками стекла и с беспорядочным расположением зерен и поэтому однородна по свойствам.

Характерной особенностью керамических материалов является хрупкость. Сопротивление разрушению тем выше, чем мельче кристаллы и меньше пористость. Например, плотная микрокристаллическая керамика на основе Al_2O_3 с размерами зерен 1–5 мкм в 5–6 раз прочнее обычной. Изделия из плотной мелкозернистой керамики – тонкой керамики – получают по более сложной технологии, и поэтому они дороги. Пористую керамику используют в качестве огнеупорных материалов, фильтров, диэлектриков в электротехнике. Более прочную плотную керамику применяют для некоторых деталей машин.

ГЛАВА 3. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Основные направления металлургического производства

В промышленности широко применяются чистые металлы, сплавы и химические соединения.

В рудах металлы связаны в окислы, сульфиды, хлориды, силикаты или другие соединения, которые называются *минералами*.

Получение металлов из руд осуществляется методами:

- пирометаллургии, протекающими при очень высоких температурах;
- гидрометаллургии, за счет выщелачивания металлов водными растворами;
- электрометаллургии, которая позволяет восстановить металлы из химических соединений и рафинировать их методом электролиза и др.

Процессы получения сплавов на основе железа (сталей и чугунов) называются *черной металлургией*, а производство цветных металлов и сплавов на их основе – *цветной металлургией*.

3.2. Получение чугуна

Для выплавки чугуна в доменных печах используют железные руды, топливо и флюсы. Железные руды содержат железо в виде оксидов Fe_3O_4 и Fe_2O_3 , гидроксидов $Fe_2O_3 \cdot H_2O$, карбонатов $FeCO_3$ и др., а также пустую породу, состоящую из SiO_2 , Al_2O_3 , MgO и др. Содержание железа в руде, предназначенной к переделу в чугун, должно составлять 55–60 %.

Топливом для доменной плавки служит *кокс*, который получают из коксующихся каменных углей после удаления из них летучих веществ.

Флюсы необходимы для удаления из доменной печи тугоплавкой пустой породы и золы топлива. На их основе образуется доменный шлак, который в жидком состоянии удаляется из печи. Флюсы выбирают в зависимости от химического состава пустой породы руды. В отечественных железных рудах в пустой породе содержится большое количество SiO_2 . Поэтому в качестве флюса используют материалы с повышенной щелочностью, к которым относится известняк $CaCO_3$. С его помощью можно снизить содержание в металле серы, которая переходит в него из кокса и железной руды.

Подготовка руды к доменной плавке осуществляется для повышения производительности процесса, снижения расхода кокса и повышения качества чугуна. Цель подготовки состоит в увеличении содержания железа в исходных материалах и уменьшении в них вредных примесей – серы и фосфора. В подготовку руды входит обогащение, агломерация или получение металлизированных окатышей.

В результате обогащения в исходном материале повышается содержание железа. При агломерации мелкий концентрат, полученный обогащением, спекают с коксовой мелочью, при этом снижается содержание серы и мышьяка, разлагаются карбонаты и получается кусковой, пористый агломерат с повышенным содержанием флюсов. Вместо агломерации может применяться окатывание, при котором измельченный концентрат, флюсы и кокс после увлажнения окатываются на специальных установках и приобретают форму шариков диаметром до 30 мм. Их высушивают и обжигают при температуре 1200–1350 °С, в результате чего они становятся прочными и пористыми. При их использовании исключается подача флюсов в доменную печь.

На [рис. 3.1](#) приведена схема устройства доменной печи. В верхнюю часть печи, где находится загрузочное устройство 8, с помощью вагонеток загружают шихту, состоящую из агломерата, кокса, флюсов или окатышей. При опускании малого конуса загрузочного устройства 8, шихта попадает в чашу, а при опускании большого конуса – в доменную печь. Сложная загрузочная система предотвращает выход газов из домны в атмосферу.

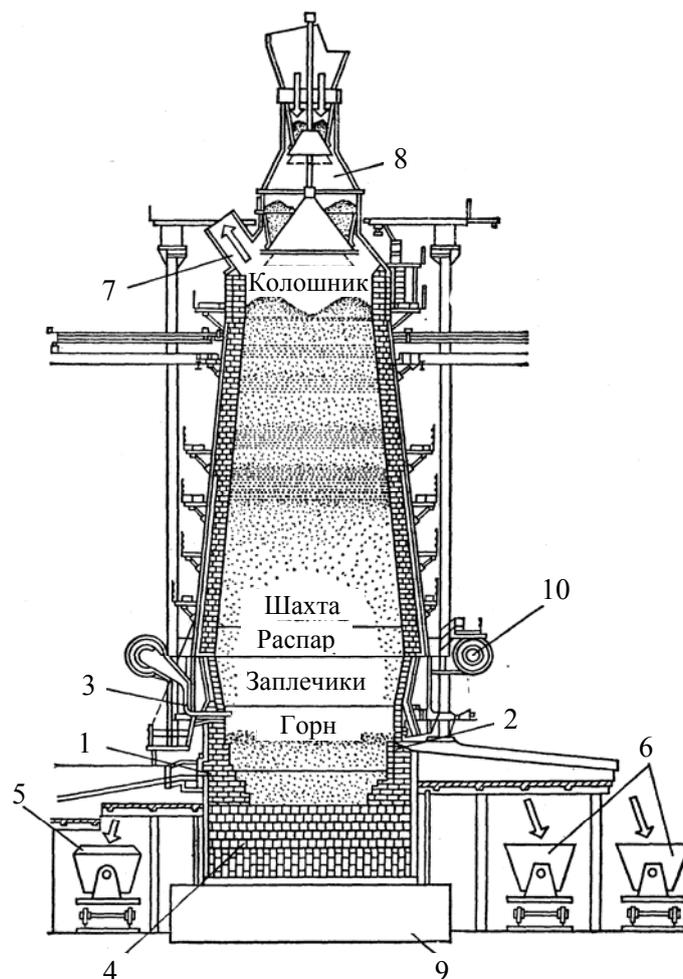


Рис. 3.1. Схема устройства доменной печи: 1 – чугунная летка; 2 – шлаковая летка; 3 – фурмы; 4 – лещадь; 5 – чугуновоз; 6 – шлаковоз; 7 – газоотводящие каналы; 8 – загрузочное устройство; 9 – фундамент; 10 – воздухопривод

По мере нагревания и протекания физико-химических процессов плавки из шихты образуется чугун. Он стекает в нижнюю часть печи, откуда периодически удаляется, а сверху через загрузочное устройство в печь подаются новые порции шихты.

Процесс выплавки чугуна начинается с горения топлива. Для этого в верхнюю часть горна через фурмы вдувают нагретый воздух. Углерод кокса, взаимодействуя с кислородом воздуха, сгорает с выделением теплоты. Образуется газовый поток, содержащий угарный газ CO, углекислый газ CO₂, водород H₂ и метан CH₄. Эти газы, поднимаясь вверх, отдают теплоту шихтовым материалам. В шихте при температуре 570 °С начинается восстановление оксидов железа.

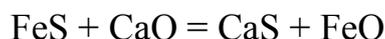
Восстановление железа в доменной печи осуществляется углеродом кокса, окисью углерода CO и водородом H₂. Восстановление железа газами называют *косвенным*, а восстановление железа твердым углеродом кокса – *прямым*.

Восстановление железа из руды происходит по мере продвижения шихты вниз и ее нагревания, от высшего окисла к низшему:



При температуре 1000–1100 °С восстановленное твердое железо, взаимодействуя с оксидом углерода и коксом, интенсивно растворяет углерод и расплавляется. Это происходит на уровне распара и заплечиков (рис. 3.1). Капли железоуглеродистого сплава (чугуна), стекая по кускам кокса, продолжают насыщаться углеродом до 4,3 %, марганцем, кремнием, фосфором, которые также восстанавливаются из руды при этой температуре.

Марганец и кремний частично переходят в образовавшийся чугун и частично в виде оксидов входят в состав шлака. Часть серы удаляется с газами при нагревании печи, другая часть серы в виде сульфида железа FeS растворяется в чугуне. Благодаря присутствию в шлаке большого количества CaO протекает реакция



Образовавшееся соединение CaS (рис. 3.1) удаляется в шлак.

Чугун выпускают из печи через 3–4 ч через чугунную летку 1 – специальное отверстие в стенке печи (рис. 3.1). Шлак выпускают через каждые 1–1,5 ч через шлаковую летку 2. Чугун сливают в ковши, а шлак – в шлаковозные чаши 6. Чугун транспортируют в сталеплавильные цеха в жидком виде или разливают в изложницы для получения слитков. Из шлака изготавливают шлаковату, цемент и т. п. Доменные газы очищают от пыли и используют для нагревания воздуха, вводимого в доменную печь.

3.3. Производство стали

3.3.1. Сущность процесса

Основными материалами для производства стали являются передельный чугун и стальной лом. Механические свойства стали гораздо выше, чем у чугуна, что объясняется пониженным содержанием углерода, а также примесей в стали по сравнению с чугуном ([табл. 3.1](#)).

Таблица 3.1

Состав передельного чугуна и низкоуглеродистой стали

Материал	Состав, %				
	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера
Передельный чугун	4,0–4,4	0,75–1,25	До 1,75	0,15–0,3	0,03–0,07
Сталь низкоуглеродистая	0,14–0,22	0,12–0,3	0,4–0,65	0,005	0,055

Сущностью любого передела чугуна в сталь является снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы.

3.3.2. Производство стали в кислородных конвертерах

Кислородный конвертер ([рис. 3.2](#)) представляет собой агрегат грушевидной формы высотой до 15 м, кожух которого изготовлен из листовой стали толщиной до 110 мм. Внутри конвертер футерован огнеупорным кирпичом. В процессе работы конвертер 2 может поворачиваться на цапфах 1 с помощью поворотного устройства 3 вокруг горизонтальной оси для завалки скрапа, заливки чугуна, разгрузки стали и шлака.

Шихтовыми материалами для кислородно-конвертерного процесса являются жидкий передельный чугун, скрап и флюсы. В состав флюсов входит известняк, железная руда, боксит Al_2O_3 и плавиковый шпат CaF_2 , который применяют для разжижения шлака.

В кислородном конвертере всегда ведут основной процесс выплавки стали, повышенную щелочность создают с помощью известняка для удаления фосфора и серы.

Перед плавкой в наклоненный конвертер через горловину загружают скрап и заливают чугун с температурой 1250–1350 °С. Шихта должна занимать 1/5 объема конвертера. После этого конвертер поворачивают в вертикальное положение и внутрь его вводят водоохлаждаемую фурму 5, через которую подают кислород под высоким давлением. Фурма не доходит до

уровня металла на 1,2–2 м. Одновременно с началом продувки в конвертер загружают флюсы.

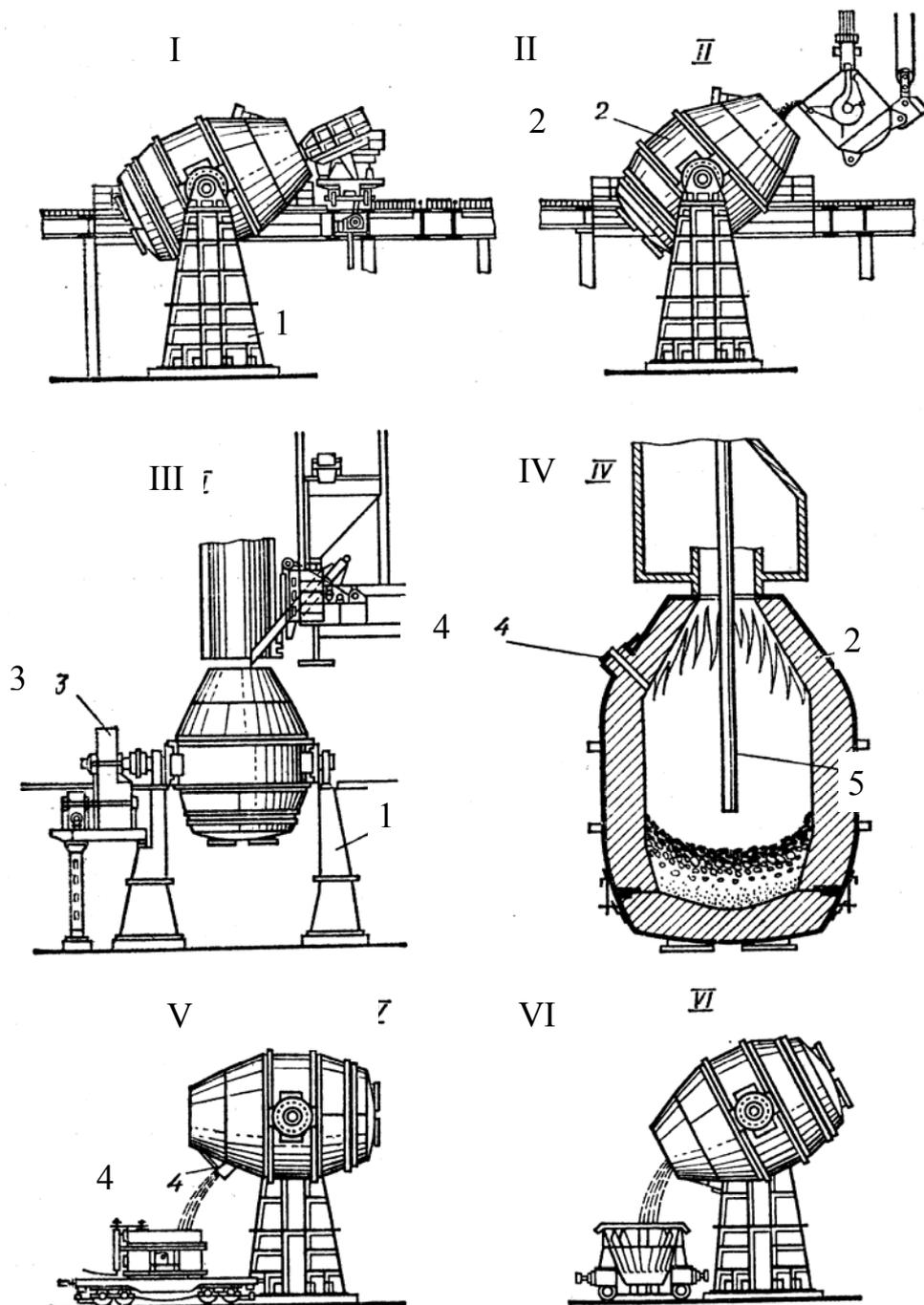


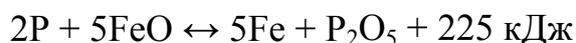
Рис. 3.2. Схема устройства кислородного конвертера и стадии выплавки стали:
 I – завалка лома; II – заливка чугуна; III – загрузка флюса; IV – продувка;
 V – выпуск стали; VI – слив чугуна; 1 – цапфы; 2 – конвертер; 3 – поворотное устройство; 4 – отверстие для выпуска стали; 5 – фурма

Для снижения содержания в чугуне углерода и примесей осуществляют их окисление. Процессы окисления сопровождаются выделением большого количества тепла, что необходимо для расплавления шихты и нагрева ванны жидкого металла. В этом состоит *первый этап* плавки.

В первую очередь под действием кислорода начинается интенсивное окисление железа в соответствии с законом действующих масс, так как в чугуне в большом количестве содержится железо и оно взаимодействует с кислородом:



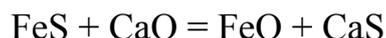
Образовавшийся оксид железа, при высоких температурах процесса, более активно, чем чистый кислород, взаимодействует с примесями чугуна. На 4–6-й минутах плавки окисляется кремний, восстанавливается железо и выделяется большое количество тепла. С окисления кремния начинается процесс шлакообразования. На 8–10-й минутах плавки начинает окисляться марганец и в виде оксида также удаляется в шлак. Фосфор начинает взаимодействовать с оксидом железа в начальный момент продувки (с 5-й минуты):



Повышенное содержание оксида железа способствует образованию P_2O_5 . Это соединение неустойчивое, и реакция может идти в обе стороны, но присутствующий в печи оксид кальция уже при невысоких температурах связывает P_2O_5 , переводя его в шлак:

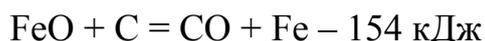


Хуже всего при кислородно-конвертерном процессе удаляется сера, присутствующая в чугуне в виде сульфида железа FeS , который начинает взаимодействовать с оксидом кальция даже при низких температурах:



Но в кислородном конвертере из-за повышенного содержания FeO сера практически не связывается кальцием, так как этот процесс сопровождается образованием FeO , который уже в избытке.

Второй этап выплавки стали – «кипение» металлической ванны начинается при достижении температуры 1450 °С. Это позволяет интенсивно протекать реакции окисления углерода, сопровождающейся поглощением теплоты:

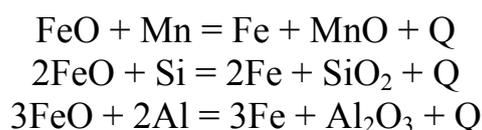


Пузырьки окиси углерода выделяются из жидкого металла, вызывая бурное кипение ванны. Оно способствует выравниванию температуры по объему конвертера и частичному удалению в шлак неметаллических включений, прилипающих к пузырькам углерода. При достижении заданного содержания углерода подачу кислорода отключают, фурму поднимают, конвертер наклоняют и сталь через летку выливают в ковш.

Третий этап выплавки стали – раскисление в кислородном конвертере не проводится, оно осуществляется в ковше осаждающим методом.

Раскисление заключается в восстановлении оксида железа FeO, растворенного в жидком металле. Кислород, выполнивший свою функцию при удалении примесей из металла, сам является вредной примесью, и его содержание необходимо снизить.

В ковш добавляют ферромарганец, ферросилиций и алюминий. Они обладают большим сродством к кислороду, чем сталь. Железо восстанавливается, а образующиеся оксиды MnO, SiO₂, Al₂O₃, обладающие меньшей плотностью, уходят в шлак:



В кислородных конвертерах выплавляют конструкционные стали с различным содержанием углерода – кипящие и спокойные. Этим способом трудно получать стали, содержащие высокое количество легкоокисляющихся легирующих элементов, поэтому кислородно-конвертерным способом можно выплавить только низколегированную сталь. Легирующие элементы вводят в ковш в расплавленном состоянии или в виде твердых ферросплавов. Кислородно-конвертерный процесс отличается высокой производительностью: выплавка стали в конвертерах вместимостью 50–300 т идет 25–50 мин.

3.3.3. Производство стали в электродуговых печах

Плавильные электропечи имеют преимущества по сравнению с другими плавильными агрегатами:

- легко регулировать тепловой процесс, изменяя параметры тока;
- можно получать высокую температуру металла;
- можно создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу и вакуум, что позволяет раскислять металл с образованием минимального количества неметаллических включений.

Электропечи используют для выплавки конструкционных низко- и высоколегированных сталей, инструментальных и специальных сталей и сплавов. Различают дуговые и индукционные электропечи.

Дуговая печь, схема которой приведена на [рис. 3.3](#), питается трехфазным переменным током, имеет три цилиндрических электрода 4 из графитированной массы, закрепленных в электрододержателях, к которым подводится электрический ток по кабелям 7. Между электродом и металлической шихтой возникает электрическая дуга. Корпус печи имеет форму цилиндра. Снаружи он заключен в прочный стальной кожух, внутри футерован основным или кислым кирпичом. Съёмный свод 3 имеет отверстия для электродов. В стенке корпуса находится рабочее окно 2 (для слива шлака, загрузки ферросплавов, взятия проб), закрытое при плавке заслонкой.

Готовую сталь 6 выпускают через сливное отверстие со сливным желобом 1. Печь опирается на секторы и имеет опорные ролики 5 для наклона в сторону рабочего окна или желоба. Печь загружают при снятом своде.

Вместимость печей составляет от 0,5 до 400 т. В металлургических цехах используют электропечи с основной футеровкой, в литейных – с кислой.

В основной дуговой печи осуществляется плавка двух видов: на шихте из легированных отходов (методом переплава) и на углеродистой шихте (с окислением примесей).

Плавку на шихте из легированных отходов ведут без окисления примесей. После расплавления шихты из металла удаляют серу, наводя основной шлак, при необходимости науглероживают и доводят металл до заданного химического состава. Проводят диффузионное раскисление, подавая на шлак измельченные ферросилиций, алюминий, молотый кокс. Так выплавляют легированные стали из отходов машиностроительных заводов.

Плавку на углеродистой шихте применяют для производства конструкционных сталей. В печь загружают шихту: стальной лом, металлизированные окатыши, чушковый передельный чугун, железную руду для окисления примесей, электродный бой или кокс для науглероживания металла, известь. Опускают электроды, включают ток. Шихта под действием электродов плавится, металл накапливается в подине печи. Во время плавления шихты кислородом воздуха, оксидами шихты и окалины окисляются железо, кремний, фосфор, марганец и частично углерод. К концу «окислительного» периода заканчивается удаление фосфора в основной железистый шлак.

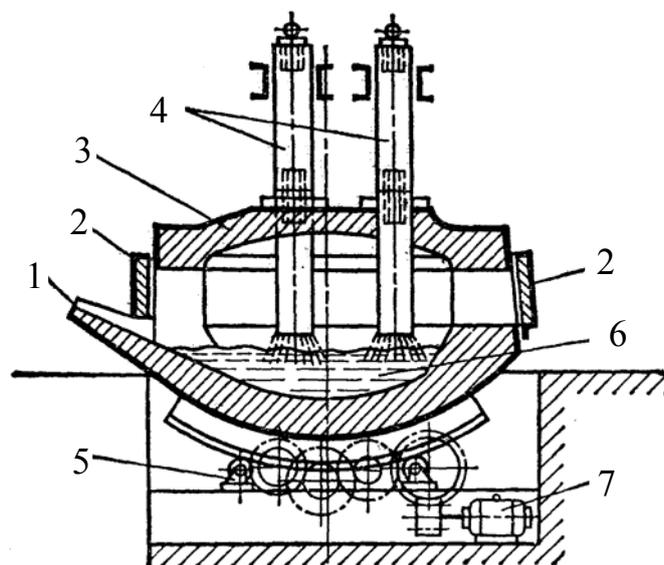


Рис. 3.3. Схема дуговой плавильной печи

После нагрева до 1500–1540 °С начинается период «кипения» металла, для дальнейшего окисления углерода.

При достижении нужного количества углерода прекращают кипение и приступают к удалению серы, раскислению для получения металла задан-

ного химического состава. Раскисление производят осаждающим и диффузионным методами. Для диффузионного раскисления наводят шлак, содержащий известняк и молотый кокс. Благодаря повышенному содержанию в шлаке оксида кальция и пониженному содержанию оксида железа в него из металла переходит сера. Для определения химического состава металла берут пробы и при необходимости вводят в печь ферросплавы для получения заданного химического состава. Затем выполняют конечное раскисление алюминием и силикокальцием, выпускают сталь в ковш.

При выплавке легированных сталей в дуговых печах в сталь вводят легирующие элементы в виде ферросплавов.

В дуговых печах выплавляют качественные и высококачественные углеродистые и легированные стали – конструкционные и инструментальные.

Индукционные тигельные плавильные печи применяют для выплавки качественных коррозионно-стойких, жаропрочных и других сталей и сплавов. Вместимость таких печей – от десятков килограммов до 30 т. Схема индукционной тигельной печи представлена на [рис. 3.4](#).

Печь состоит из водоохлаждаемого индуктора 3, внутри которого находится тигель 4, выполненный из основного или кислого огнеупорного материала. Через индуктор от генератора высокой частоты проходит однофазный переменный ток частотой 500–2000 Гц.

При пропускании тока через индуктор в металлической шихте 1, находящейся в тигле, индуцируются мощные вихревые токи, что обеспечивает нагрев и плавление металла. Для уменьшения потерь тепла печь имеет съемный свод 2.

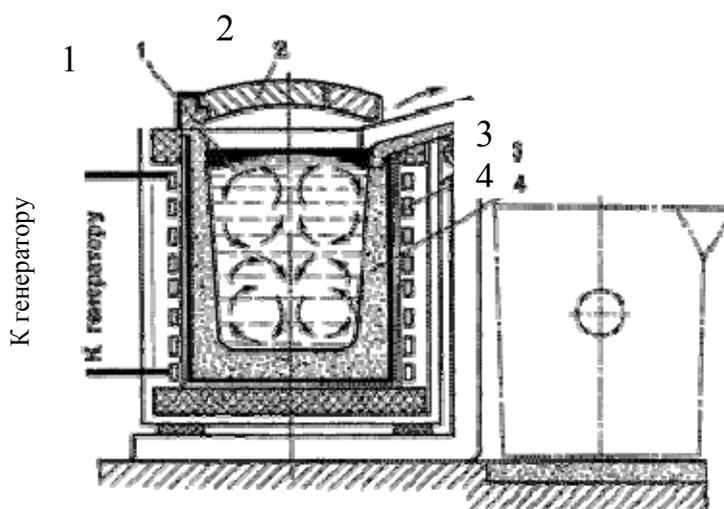


Рис. 3.4. Схема индукционной тигельной печи

Под действием электромагнитного поля индуктора при плавке происходит интенсивная циркуляция жидкого металла, что способствует ускорению химических реакций, получению однородного по химическому составу

металла, быстрому всплыванию неметаллических включений, выравниванию температуры.

В индукционных печах выплавляют сталь и сплавы из легированных отходов *методом переплава* или из чистого шихтового железа и скрапа с добавкой ферросплавов *методом сплавления*.

После расплавления шихты на поверхность металла загружают шлаковую смесь для снижения тепловых потерь металла, уменьшения угара легирующих элементов и защиты его от насыщения газами.

При плавке в кислых печах, после расплавления и удаления плавильного шлака, наводят шлак из SiO_2 . Для окончательного раскисления перед выпуском металла в ковш вводят ферросилиций, ферромарганец и алюминий.

В основных печах раскисление проводят смесью из порошкообразной извести, кокса, ферросилиция, ферромарганца и алюминия.

В основных печах выплавляют высококачественные, легированные стали с высоким содержанием марганца, титана, никеля, алюминия, а в печах с кислой футеровкой – конструкционные, легированные другими элементами стали.

В индукционных печах можно получать стали с незначительным содержанием углерода и безуглеродистые сплавы, так как нет науглероживающей среды.

При вакуумной индукционной плавке индуктор, тигель, дозатор шихты и изложницы помещают в вакуумные камеры. Получают сплавы высокого качества с малым содержанием газов, неметаллических включений и сплавы, легированные любыми элементами.

3.3.4. Разливка стали

Из плавильных печей сталь выпускают в ковш, который мостовым краном переносят к месту разливки стали. Из ковша сталь разливают в изложницы или кристаллизаторы машины для непрерывного литья заготовок. В изложницах или кристаллизаторах сталь затвердевает, и получают слитки, которые подвергаются прокатке, ковке.

Изложницы – чугунные формы для изготовления слитков – выполняют с квадратным, прямоугольным, круглым и многогранным поперечными сечениями. Слитки с квадратным сечением переделывают на сортовой прокат: двутавровые балки, швеллеры, уголки. Слитки прямоугольного сечения – на листы. Слитки круглого сечения используются для изготовления труб, колес. Слитки с многогранным сечением применяют для изготовления поковок.

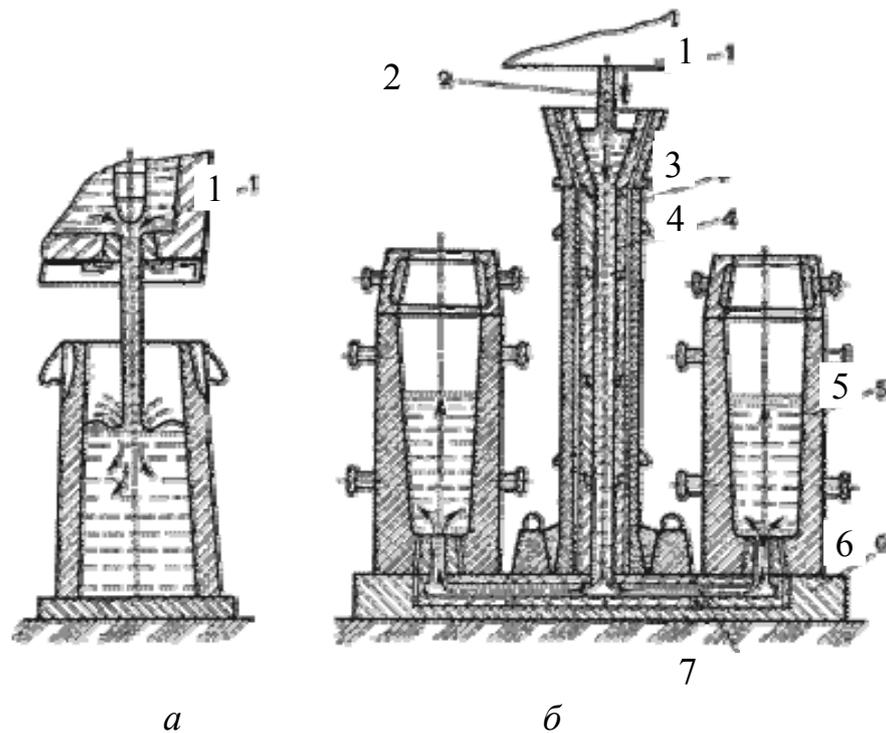


Рис. 3.5. Разливка стали в изложницы: *а* – сверху; *б* – снизу (сифоном)

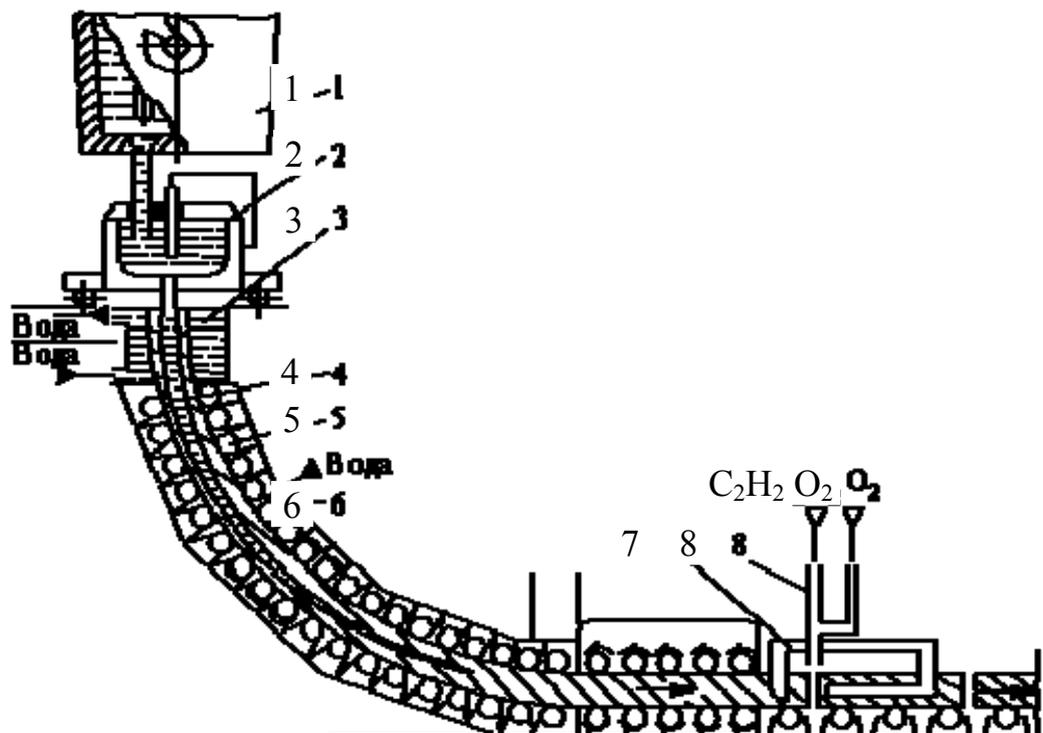


Рис. 3.6. Схема машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ): *1* – ковш; *2* – промежуточное разливочное устройство; *3* – кристаллизатор; *4* – затвердевающий слиток; *5* – тянущие валки; *6* – форсунки; *7* – зона резки; *8* – газовый резак

Спокойные и кипящие углеродистые стали разливают в слитки массой до 25 т, легированные и высококачественные стали – в слитки массой 0,5–7 т, а некоторые сорта высоколегированных сталей – в слитки до нескольких килограммов.

Сталь разливают в изложницы сверху (рис. 3.5, а), снизу (сифоном) (рис. 3.5, б) и на машинах непрерывного литья (рис. 3.6).

Для разливки углеродистых сталей в изложницы сталь разливают сверху, как показано на рис. 3.5, а, непосредственно из ковша 1. При этом исключается расход металла на литники, упрощается подготовка оборудования к разливке. К недостаткам следует отнести менее качественную поверхность слитков из-за наличия пленок оксидов от брызг металла, затвердевающих на стенках изложницы.

Метод сифонной разливки используют для легированных и высококачественных сталей. При сифонной разливке, приведенной на рис. 3.5, б, большую массу металла одновременно разливают в несколько изложниц (4–60). Изложницы устанавливаются на поддоне 6, в центре которого располагается центровой литник 3, футерованный огнеупорными трубками 4, соединенный каналами 7 с изложницами. Жидкая сталь 2 из ковша 1 поступает в центровой литник и снизу плавно, без разбрызгивания, наполняет изложницу 5. Поверхность слитка получается чистой.

Разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) состоит в том, что жидкий металл из ковша через промежуточное разливочное устройство подается в кристаллизатор, из нижней части которого вытягивается затвердевающий слиток (рис. 3.6). Скорость вытягивания слитков с сечением 150 × 150 мм и 300 × 2000 мм равна примерно 15 мм/с. На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается водой, а затем подается в зону резки, где его разрезают газовым резаком на заготовки заданной длины.

Вследствие направленного затвердевания и непрерывного питания при усадке, слитки имеют плотное строение и мелкозернистую структуру, в них отсутствуют усадочные раковины. Выход годных заготовок, полученных на МНЛЗ, может достигать 96–98 % массы разливаемой стали. На этих машинах получают заготовки квадратного, прямоугольного или круглого сечения, которые после резки на мерные длины используют в прокатном производстве.

Прокатку широко применяют на металлургических предприятиях для изготовления машиностроительных профилей.

Для производства сортовых профилей прокаткой используют заготовки квадратного сечения размером 120–450 мм, полученные на МНЛЗ. Затем на сортовых прокатных станах заготовки проходят через несколько пар вращающихся ручьевых валков, в результате чего получают профили. Чем больше разность в размерах поперечных сечений исходной заготовки и конечного изделия и чем сложнее профиль последнего, тем больше число последовательно расположенных пар валков прокатного стана требуется для его получения.

Широкое распространение в мировой практике получило производство горячекатаных листов на широкополосных прокатных станах из слябов толщиной 200–250 мм, полученных на МНЛЗ. Традиционный производственный

комплекс состоит из сталеплавильного цеха с отделением непрерывного литья и широкополосного стана горячей прокатки и прокатки бесшовных труб, профилей простой и периодической формы, заготовок шаров, роликов подшипников качения и зубчатых колес.

3.3.5. Способы повышения качества стали

Улучшить качество металла можно уменьшением в нем вредных примесей, газов, неметаллических включений. Для повышения качества металла используют: обработку синтетическим шлаком, вакуумную дегазацию металла, электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-дуговой переплав (ВДП), переплав металла в электронно-дуговых и плазменных печах и т. д.

Вакуумная дегазация проводится для уменьшения содержания в металле газов и неметаллических включений.

Вакуумирование стали проводят в ковше, при переливе из ковша в ковш, при заливке в изложницу.

Для вакуумирования в ковше ковш с жидкой сталью помещают в камеру, закрывающуюся герметичной крышкой. Вакуумными насосами создают разрежение до остаточного давления 0,267–0,667 кПа. При понижении давления из жидкой стали выделяются водород и азот. Всплывающие пузырьки газов захватывают неметаллические включения, в результате чего содержание их в стали снижается. В результате улучшаются прочность и пластичность стали.

Электрошлаковый переплав (ЭШП) применяют для выплавки высококачественных сталей для подшипников, жаропрочных сталей.

Схема электрошлакового переплава представлена на [рис. 3.7](#). Переплаву подвергается выплавленный в дуговой печи и прокатанный на пруток металл. Источником теплоты является шлаковая ванна, нагреваемая электрическим током. Электрический ток подводится к переплавляемому электроду 1, погруженному в шлаковую ванну 2, и к поддону 9, установленному в водоохлаждаемом кристаллизаторе 7, в котором находится затравка 8. Выделяющаяся теплота нагревает ванну 2 до температуры свыше 1700 °С и вызывает оплавление конца электрода. Капли жидкого металла 3 проходят через шлак и образуют под шлаковым слоем металлическую ванну 4. Перенос капель металла через основной шлак способствует удалению из металла серы, неметаллических включений и газов. Металлическая ванна пополняется путем расплавления электрода и под воздействием кристаллизатора постепенно формируется в слиток 6, покрытый шлаковой коркой 5. Содержание кислорода уменьшается в 1,5–2 раза, серы – в 2–3 раза. Слиток отличается плотностью, однородностью, хорошим качеством поверхности, высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Слитки получают круглого, квадратного и прямоугольного сечения, массой до 110 т.

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП) применяют в целях удаления из металла газов и неметаллических включений. Процесс осуществляется в вакуумно-дуговых печах с расходуемым электродом. Катод изготавливают механической обработкой слитка, выплавляемого в электропечах или установках ЭШП.

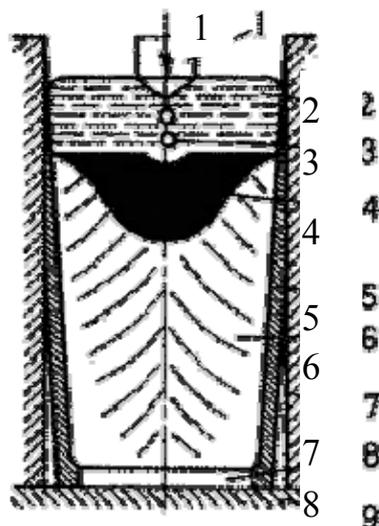


Рис. 3.7. Схема электрошлакового переплава

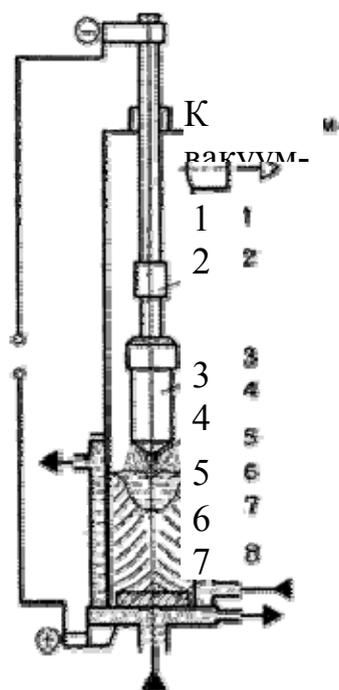


Рис. 3.8. Схема вакуумно-дугового переплава

Схема вакуумно-дугового переплава представлена на рис. 3.8. Расходуемый электрод 3 закрепляют на водоохлаждаемом штоке 2 и помещают в корпус печи 1 и далее в медную водоохлаждаемую изложницу 6. Из корпуса печи откачивают воздух до остаточного давления 0,00133 кПа. При подаче напряжения между расходуемым электродом 3 (катодом) и затравкой 8

(анодом) возникает дуга. Выделяющаяся теплота расплавляет конец электрода. Капли жидкого металла 4, проходя зону дугового разряда, дегазируются, заполняют изложницу и затвердевают, образуя слиток 7. Дуга горит между электродом и жидким металлом 5 в верхней части слитка на протяжении всей плавки. Охлаждение слитка и разогрев жидкого металла создают условия для направленного затвердевания слитка. Следовательно, неметаллические включения сосредотачиваются в верхней части слитка, усадочная раковина мала. Слиток характеризуется высокой равномерностью химического состава, повышенными механическими свойствами. Масса слитков достигает 50 т.

Вакуумно-дуговой переплав применяют при изготовлении деталей турбин, двигателей, авиационных конструкций.

3.3.6. Прямое восстановление железа

Получение железа в виде губки непосредственно из руды, минуя доменную печь, называют *прямым восстановлением железа*. Этот процесс протекает без применения кокса, что позволяет получать чистый металл, поскольку фосфор и особенно серу кокс вносит в больших количествах.

Агрегатами для реализации этого процесса служат шахтные печи, а в качестве восстановителя чаще всего применяют конвертированный природный газ, состоящий в основном из водорода и оксида углерода (35 %), который подают в печь при температуре 1000 °С.

Расширение использования бедных руд и стремление к более глубокому их обогащению привели к получению тонкоизмельченных железорудных концентратов, для которых появилась необходимость найти новые способы окускования. В связи с этим в подготовку фазы были включены процессы окатывания или окомкования, которые состоят из двух стадий:

- 1) получение сырых (мокрых) окатышей;
- 2) упрочнение окатышей (подсушка при 300–600 °С и обжиг при 1200–1350 °С).

Для лучшего окомкования и обеспечения необходимой прочности к железорудному концентрату добавляют связующее вещество, обычно бентонит (мелкодисперсная глина) и воду. После этого в грануляторе получают шарики диаметром 10–20 мм. Основная цель обжига окатышей сводится к упрочнению их до такой степени, чтобы они выдерживали транспортировку без значительных разрушений.

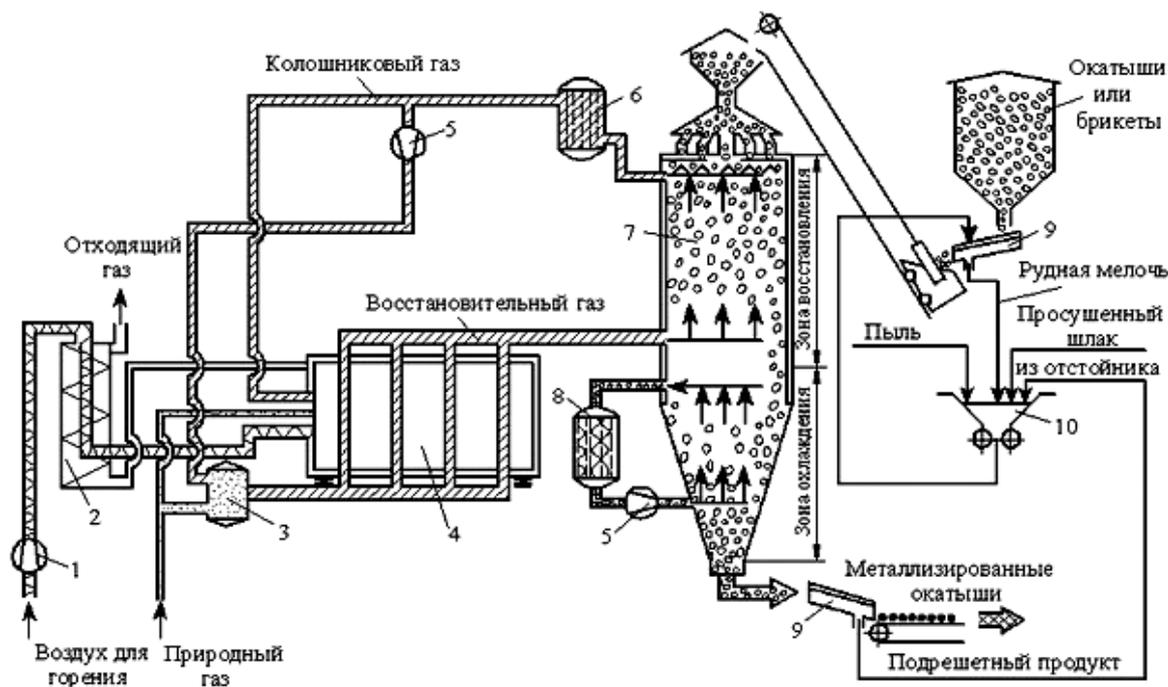


Рис. 3.9. Схема процесса получения губчатого железа в шахтной печи: 1 – воздухоудвка; 2 – теплообменник; 3 – смеситель газов; 4 – конверсионная установка; 5 – компрессор; 6 – скруббер для колошникового газа; 7 – шахтная печь; 8 – скруббер; 9 – вибрационный грохот; 10 – брикетный пресс

Процесс восстановления железа (производство металлизированных окатышей) в шахтных печах осуществляют в противопотоке: железорудные материалы загружают сверху, а восстановительные газы подают снизу (рис. 3.9).

Удельная производительность шахтных печей в 2–4 раза выше, чем доменных. Металлизированные окатыши содержат примерно 95 % Fe и до 2 % C. Расход природного газа составляет около 400 м³ на 1 т губчатого железа.

Далее выплавка стали производится в дуговых электропечах. В качестве основных шихтовых материалов используются металлизированные окатыши, стальной лом и различные ферросплавы. После расплавления шихтовых материалов выплавляемую сталь при необходимости науглероживают и доводят до нужного химического состава. Затем проводят диффузионное раскисление и сталь выпускают из печи. Сталь в ковше либо подвергают вакуумированию, либо продувают аргоном с рафинирующим порошком. Длительность плавки составляет 2,5–3 ч. Этим способом выплавляют высококачественные высоколегированные стали.

3.4. Производство цветных металлов

3.4.1. Производство алюминия

Алюминий получают из сырья, содержащего значительное количество глинозема, – бокситов, каолинов, нефелинов и алунитов. Бокситы содержат 50–60 % Al_2O_3 и являются главным видом сырья для получения алюминия. Технология получения алюминия включает: извлечение из сырья глинозема Al_2O_3 ; получение алюминия электролизом глинозема; рафинирование алюминия.

Глинозем Al_2O_3 – окисел высокой стойкости; температура плавления – 2050 °С. В зависимости от количества и характера примесей, входящих в состав сырья, для извлечения глинозема применяются различные способы, среди которых наиболее распространен щелочной. По этому способу бокситовую муку, смешанную с содой, спекают при 800–1000 °С для получения растворимого в воде алюмината натрия $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$. Его выщелачивают водой и продувают углекислотой для получения осадка гидроксида алюминия. После промывки и сушки осадок прокаливают, отделяют воду и получают глинозем.

Так как глинозем вследствие его тугоплавкости трудно расплавлять, его смешивают с криолитом Na_3AlF_6 , который плавится при температуре 1000 °С. Растворы глинозема в криолите эвтектического состава (около 15 % Al_2O_3) плавятся при 940 °С. Электролиз растворов, содержащих 8–10 % глинозема, производится в специальных ваннах – электролизерах. Упрощенная схема электролизера приведена на [рис. 3.10](#).

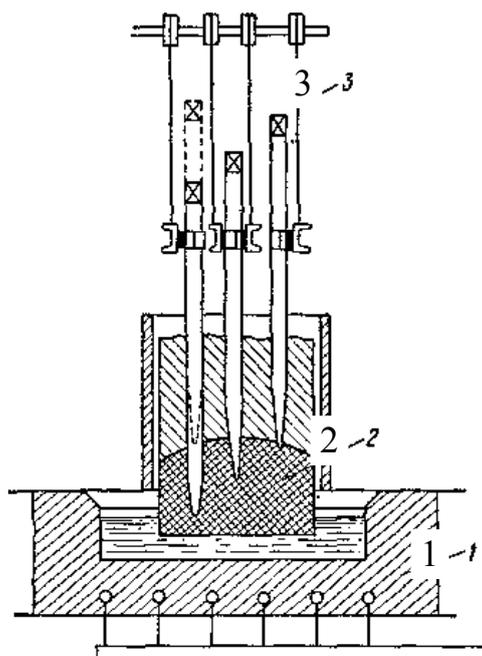


Рис. 3.10. Схема алюминиевого электролизера

Анод из нефтяного или смоляного кокса и каменноугольного пека 2 снаружи имеет кожух из тонких листов алюминия, который по мере необходимости наращивается сверху коробками и заполняется анодной массой. По мере опускания анода механизмом 3 анодная масса постепенно спекается и становится твердой. Подвод тока к аноду осуществляется сверху от анодной линии через стальные штыри, забиваемые в анод. Штыри перемещаются также с помощью механизма 3. На дне ванны укладывают углеродистые блоки 1, к которым подается ток от катодной шины. Боковые стенки электролизера также облицовываются углеродистыми блоками. Электролизер заключен в кожух. Выделяющийся фтористый водород улавливается. Ванна в период работы заполнена расплавленным криолитом, в который периодически подают глинозем. Электролизеры питаются током 50000–155000 А, напряжением 4–4,5 В. Ток используется не только для обеспечения процессов электролиза глинозема, но и для получения тепла, необходимого для поддержания высокой температуры электролита (950–1000 °С). Получаемый в жидком виде на катоде (дне ванны) алюминий один раз в течение трех-четырех суток откачивается с помощью вакуумного ковша, соединенного с вакуумным насосом.

Полученный в электролизере алюминий подвергается рафинированию продувкой в ковшах хлором. Получение алюминия высокой чистоты чаще всего достигается электролитическим рафинированием. Анодом служит подлежащий очистке алюминий, катодом – пластины чистого алюминия. В качестве электролита используются расплавленные хлористые и фтористые соли при 750 °С. Выпускаемые марки алюминия высокой чистоты содержат 0,005–0,05 % примесей, алюминий особой чистоты – до 0,001 % примесей.

3.4.2. Производство меди

Медь в природе находится в виде сернистых соединений (CuS , Cu_2S), оксидов (CuO , Cu_2O), гидрокарбонатов ($\text{Cu}(\text{OH})_2$), углекислых соединений CuCO_3 в составе сульфидных руд и самородной металлической меди.

В промышленности 90 % первичной меди получают пирометаллургическим способом, 10 % – гидрометаллургическим.

Гидрометаллургический способ – получение меди путем ее выщелачивания слабым раствором серной кислоты и последующего выделения металлической меди из раствора.

Пирометаллургический способ получения меди состоит из обогащения, обжига, плавки на штейн, продувки в конвертере, рафинирования.

Обогащение медных руд позволяет получать медный концентрат, содержащий 10–35 % меди.

Медные руды и концентраты, содержащие большое количество серы, подвергаются окислительному обжигу. В процессе нагрева концентрата или руды до 700–800 °С в присутствии кислорода воздуха сульфиды окисляются и содержание серы снижается почти вдвое против исходного. Обжигают

только бедные (с содержанием меди 8–25 %) концентраты, а богатые (25–35 % меди) плавят без обжига.

После обжига руда и медный концентрат подвергаются плавке на штейн, представляющий собой сплав, содержащий сульфиды меди и железа (FeS , Cu_2S). Штейн содержит 20–50 % меди, 20–40 % железа, 22–25 % серы, около 8 % кислорода и примеси никеля, цинка, свинца, золота, серебра. Чаще всего плавка производится в пламенных отражательных печах. Температура в зоне плавки – 1450 °С.

Полученный медный штейн, с целью окисления сульфидов и железа, подвергают продувке сжатым воздухом в горизонтальных конвертерах с боковым дутьем. Образующиеся окислы переводят в шлак, а серу – в SO_2 . Тепло в конвертере выделяется за счет протекания химических реакций без подачи топлива. Температура в конвертере составляет 1200–1300 °С. Таким образом в конвертере получают черновую медь, содержащую 98,4–99,4 % меди, 0,01–0,04 % железа, 0,02–0,1 % серы и небольшое количество никеля, олова, сурьмы, серебра, золота.

Черновую медь рафинируют для удаления вредных примесей, проводят огневое, а затем электролитическое рафинирование.

Сущность огневого рафинирования черновой меди заключается в окислении примесей, имеющих большее сродство к кислороду, чем медь, удалении их с газами и переводе в шлак. После огневого рафинирования получают медь чистотой 99–99,5 %. Ее разливают в изложницы и получают слитки для дальнейшей выплавки сплавов (бронзы и латуни) или для электролитического рафинирования.

Электролитическое рафинирование проводят для получения чистой от примесей меди (99,95 % Cu). Электролиз проводят в ваннах, где анод изготавливают из меди огневого рафинирования, а катод – из тонких листов чистой меди. Электролитом служит водный раствор CuSO_4 (10–16 %) и H_2SO_4 (10–16 %). При пропускании постоянного тока анод растворяется, медь переходит в раствор, а на катодах разряжаются ионы меди, осаждаясь на них слоем чистой меди. Примеси осаждаются на дно ванны в виде шлака, который идет на переработку с целью извлечения благородных металлов. Катоды выгружают через 5–12 дней, когда их масса достигнет 60–90 кг, затем переплавляют в электропечах.

Медь по чистоте подразделяется на марки, содержащие от 99 до 99,95 % Cu .

3.4.3. Производство магния

Сырьем для получения магния служат следующие материалы: карналлит $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (содержит 12–30 % хлористого магния), магнезит MgCO_3 (свыше 45 % MgO), доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ (14–22 % MgO), бишофит $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (свыше 46 % MgCl_2). Магний получают двумя способами: электролизом хлоридов и термическим восстановлением из руд.

При получении магния электролитическим способом из такого сырья,

как магнезит, сначала получают хлорид магния. Для этого магнезит подвергают обжигу при температуре 850–900 °С с целью удаления CO_2 и получения MgO . Затем хлорированием в присутствии углерода получают хлорид магния MgCl_2 , который подвергают электролизу.

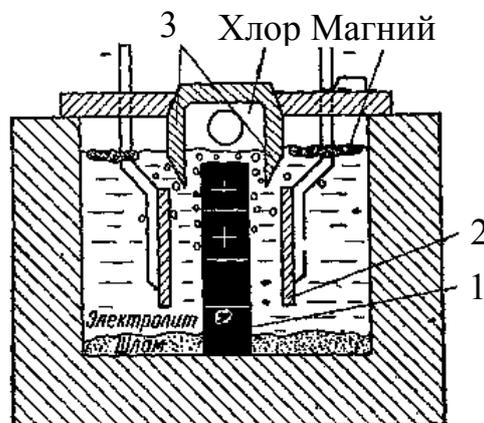


Рис. 3.11. Схема ванны для электролиза хлоридов магния

На [рис. 3.11](#) приведена принципиальная схема одной секции ванны для электролиза хлоридов магния. Ванна прямоугольной формы имеет огнеупорную футеровку. Анодом служит графитовая пластина *1*, катодами – стальные пластины *2*. Между анодом и катодом имеется перегородка *3* из шамотного кирпича. В каждой ванне собирают несколько секций, состоящих из анодных блоков и двух катодных пластин. Сила тока в ваннах достигает 30 000–50 000 А при напряжении 7 В. Электролитом при электролизе хлористого магния служит сплав солей: 8–16 % MgCl_2 , 25–35 % CaCl_2 , 25–35 % NaCl и 18–25 % KCl . При электролизе MgCl_2 разлагается: хлор выделяется на аноде, магний – на катоде. В результате из 4,5 т MgCl_2 получают 1 т магния и 2,9 т хлора. Так как магний легче электролита, то он всплывает и с поверхности электролита извлекается вакуумными ковшами.

Для получения магния применяют и более простые термические методы, состоящие в восстановлении магния из его соединений кремнием, углеродом и другими элементами. Эти способы позволяют использовать дешевые виды сырья и топлива.

3.4.4. Производство титана

Промышленное значение имеют титаносодержащие минералы: ильменит FeO-TiO_2 (содержит до 61 % TiO_2), рутил TiO_2 (около 10 % окислов железа, остальное TiO_2).

Особенности производства титана обусловлены его высокой химической активностью и большим сродством к кислороду, азоту, водороду и другим элементам.

Титановые руды подвергают обогащению, в результате которого полу-

чают концентраты, содержащие до 60 % TiO_2 . Способом переработки железотитановых концентратов является плавка в электрических печах. Восстановительной плавкой получают чугуны, легированный титаном (0,6–2,0 % Ti), и шлаки, содержащие около 80 % TiO_2 и 1,5–3,0 % FeO, используемые в качестве сырья для получения титана.

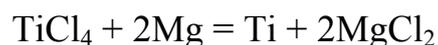
Производство металлического титана из титановых концентратов или шлаков сводится к получению:

- тетраоксида титана TiCl_4 , представляющего собой жидкость, кипящую при 136 °С;
- титановой губки (восстановлением тетраоксида титана);
- слитков компактного титана из титановой губки.

Получение тетраоксида титана из рутила TiO_2 производится восстановлением углеродом и хлорированием при 800 °С по реакции



Получение титановой губки производится восстановлением тетраоксида титана магнием по реакции



Процесс ведется в стальных реакторах при температуре 950–1000 °С в атмосфере аргона или других инертных газов.

Получение компактного пластичного титана из губки чаще всего осуществляется плавкой в электрических дуговых или высокочастотных печах в вакууме или в среде инертных газов. После плавки получают титан, содержащий около 0,2 % примесей, отличающийся высокой пластичностью, хорошо поддающийся прокатке, ковке и штамповке.

Чистый титан может быть получен из технического титана методом зонной плавки.

ГЛАВА 4. СПОСОБЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Формообразование – основной этап придания конструкционному материалу требуемой геометрической формы детали согласно чертежу. Формообразующие технологические процессы можно классифицировать по агрегатному состоянию заготовок или деталей. В данной главе рассматривается формообразование из парообразного, жидкого и твердого состояний и условия получения при первичном формообразовании заготовок и деталей.

4.1. Формообразующие технологические процессы

Формообразующие процессы по методу их исполнения принято подразделять на следующие:

- *осаждение из парогазовой фазы*, при котором конфигурация заготовки формируется в результате конденсации парообразных или газообразных химических элементов с образованием твердых осадков;
- *литье*, в процессе которого формообразование заготовки или детали осуществляется из жидкого материала путем заполнения им полости заданной формы и размеров с последующим затвердеванием;
- *формование*, заключающееся в получении заготовки или детали из порошкового или волокнистого материала путем заполнения полости заданной формы и размеров с последующим уплотнением;
- *гальванопластика* – процесс получения изделий из жидкого материала путем осаждения металла из раствора под действием электрического тока;
- *обработка давлением*, в процессе которой происходит изменение формы, размеров, шероховатости и свойств первичной заготовки (слитка, профиля) в результате пластической деформации и/или разделения изделия без образования стружки;
- *механическая обработка резанием*, в процессе которой происходит изменение формы, размеров, шероховатости путем деформирования и последующего отделения поверхностного слоя заготовки с образованием стружки;
- *электрофизическая и электрохимическая обработка*, заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости поверхностей заготовки путем использования электрических разрядов, магнитострикционного эффекта, электронного или оптического излучения и растворения ее материала в электролите под действием электрического тока;
- *сборка*, в процессе которой происходит образование разъемных и неразъемных соединений составных частей заготовки или изделия путем навинчивания, сварки, пайки, клепки, склеивания и т. д.

4.2. Изделия и покрытия, получаемые из материалов в парогазовой фазе

Изделия и покрытия, получаемые из материалов в парогазовой фазе, играют существенную роль в современной промышленности, и можно ожидать, что в будущем их применение значительно расширится. Это объясняется тем, что осаждение осадка из парогазовой фазы – универсальный и относительно экономичный метод получения покрытий, порошков и изделий путем контролируемого осаждения вещества в виде отдельных атомов или молекул.

Различают два вида осаждения:

- *физическое осаждение*, которое иногда называют вакуумно-конденсационным напылением;
- *химическое*, или газофазное, осаждение.

Преимуществом физического осаждения является то, что заготовка находится при температуре окружающей среды. Для получения осадка в нужном месте температура изделия должна быть ниже температуры испаряемого вещества.

При химическом осаждении поверхность должна быть нагрета до более высокой температуры, чем газообразные соединения. В результате возможно термическое разложение летучего соединения и осаждение материала на поверхность заготовки.

Осаждение из парогазовой фазы можно рассматривать как ряд последовательных стадий: испарение, перенос, образование и рост кристаллитов.

Термическое испарение твердого тела или жидкого материала является простейшим способом получения паров для последующего осаждения. Скорость простого термического испарения можно повысить с помощью катодного распыления, т. е. путем бомбардировки поверхности мишени ионами с большой кинетической энергией. В результате атомы материала мишени переходят в парообразное состояние.

Другим способом испарения является химическое, при котором химически активный газ адсорбируется на поверхности исходного материала и реагирует с ним. Летучий продукт этой реакции десорбируется и его можно перенести в другие части системы, где он подвергается дополнительной очистке или вступает в реакцию, образуя осадок.

После того как исходный материал переведен в парообразное или газообразное состояние, его требуется транспортировать в то место, где нужно получить осадок.

При физическом осаждении сопротивление переносу незначительное, поскольку процесс осуществляется в высоком вакууме.

При химическом осаждении в замкнутых камерах скорость переноса источника осаждаемого материала до покрываемой поверхности зависит от температуры газа и скорости диффузии газообразных реагентов. Получаемые покрытия формируются из отдельных атомов. Следовательно, этим методом

можно получать изделия, плотность которых будет близка к теоретической. Однако причиной разрушения многих покрытий является неблагоприятное взаимное расположение кристаллитов, растущих из изолированных центров.

Заготовки и покрытия, получаемые химическим осаждением, обычно состоят из столбчатых кристаллитов, растущих от подложки к внешней поверхности. Отдельные кристаллиты могут быть весьма прочными, однако они плохо связаны друг с другом. При поперечной нагрузке такие осадки разрушаются при напряжениях существенно ниже предела прочности материала покрытия.

Физическое осаждение. Среди методов физического осаждения большое значение приобретает алюминирование пластмассовых и стальных изделий путем вакуумно-конденсационного напыления термически испаряемого алюминия. Этот технологический процесс широко используется в оптической технике для получения тонких пленок металлических и неметаллических материалов, способных изменять прохождение световых волн.

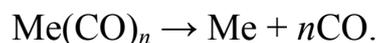
Химическое осаждение. Потребность авиационной техники в изделиях и покрытиях из тугоплавких материалов способствует развитию технологии химического осаждения, которая не только позволяет получать изделия сложной конфигурации, но и может стать эффективным способом соединения заготовок из тугоплавких металлов путем осаждения нужного материала в зазоре между соединяемыми элементами. Отсутствие в изделии шва и околошовной зоны с крупнозернистой структурой является основным преимуществом этого технологического процесса по сравнению со сваркой плавлением при прочих равных условиях. Известно применение никеля, образующегося при разложении карбонила никеля $\text{Ni}(\text{CO})_4$, для формирования нахлесточного соединения стальных и керамических элементов конструкции.

Ниобий, молибден, титан и вольфрам, которые нельзя осадить электрическим методом из водных растворов, легко осаждаются при водородном восстановлении соответствующих газообразных галогенидов. Формообразование волокон бора диаметром 75–200 мкм, применяемых в композитах, осуществляют путем восстановления треххлористого бора водородом. В результате химического осаждения бора на вольфрамовые нити диаметром 10–12 мкм образуются волокна, прочность которых во многом зависит от наличия локальных дефектов в виде крупных кристаллитов, инородных включений, трещин, пустот и др. Производительность промышленного процесса получения волокон с заданными свойствами возрастает с увеличением температуры процесса. Превышение температуры 13 000 °С приводит к образованию крупных кристаллитов, что заметно снижает их прочность. Для повышения термостойкости волокон на их поверхность химическим осаждением наносят слой карбидов кремния или бора толщиной 2–6 мкм.

После того как был открыт легко разлагающийся летучий карбонил никеля, возникла новая отрасль металлургии – *газофазная металлургия*. В

настоящее время в этой отрасли используются наряду с карбонильным методом и галогенидные процессы.

При химическом осаждении разложение карбонильных или других соединений проводят при низком давлении, в результате чего получают осадок высокой степени чистоты и равномерности. Суммарные реакции применительно к карбонилам $[\text{Me}(\text{CO})_n]$ можно записать в следующем виде:



Для упрочнения деталей машин широко применяют *поверхностное легирование*, которое может осуществляться в газовой среде. Химико-термическая обработка (ХТО) сводится к диффузионному насыщению поверхностного слоя заготовки неметаллами (С, N₂, Si, В и др.) или металлами (Cr, Al, Zn и др.) в процессе выдержки при определенной температуре в активной газовой среде.

При ХТО одновременно протекают несколько процессов:

- образование в окружающей среде диффундирующего элемента в атомарном или ионизированном состоянии;
- адсорбция атомов (ионов) на поверхности изделия с образованием химических связей между ионами насыщающего элемента и основного металла (химосорбция);
- диффузия адсорбированных атомов в глубь обрабатываемой заготовки.

Толщина диффузионного слоя зависит от температуры насыщения, продолжительности процесса, характера образующегося твердого раствора (внедрения или замещения), атомно-кристаллического строения материала заготовки и концентрации диффундирующего элемента на поверхности. С повышением температуры, увеличением длительности процесса насыщения и концентрации диффундирующего элемента возрастает толщина легированного слоя.

Скорость диффузии атомов насыщающего элемента, образующего с металлом заготовки твердые растворы внедрения, значительно выше, чем при образовании твердого раствора замещения. Диффузия элементов протекает интенсивнее в решетке α -железа, чем в более плотно упакованной решетке γ -железа.

К ХТО в газовой фазе относят процессы цементации, нитроцементации, азотирования и диффузионного насыщения металлами (Al, Cr, Zn и др.) или смесями компонентов (Al и Si, Cr и Si, В и Al и др.).

При *электроэрозионной и электрохимической обработке* заготовок практически отсутствует силовое воздействие инструмента на заготовку, поэтому погрешности формы и размеров изделия ниже, чем при механической обработке резанием. Электрофизические и электрохимические процессы предназначены в основном для обработки изделий из очень твердых, вязких и хрупких материалов.

Наиболее широкое применение получила электроэрозионная обработка (ЭЭО), заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхностей заготовок в результате электрической эрозии. Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла. Процесс ЭЭО происходит в рабочей жидкости, которая заполняет пространство между электродами. При этом один электрод – заготовка, а другой – инструмент. Под воздействием сил, возникающих в канале разряда, жидкий и парообразный металл выбрасывается из зоны разряда в рабочую жидкость и застывает в ней с образованием гранул диаметром 0,01–0,005 мм.

Электрохимическая обработка основана на законах электрохимии. По используемым процессам различают анодную и катодную обработку, а по технологическим возможностям – размерную и поверхностную. Анодно-механическая обработка основана на сочетании электротермических и электромеханических процессов. Обрабатываемую заготовку подключают к аноду, а инструмент – к катоду, в качестве которого используют металлические диски, ленту и проволоку. Обработку ведут в электролите, а заготовке и инструменту задают такие же движения, как и при обычных процессах механической обработки резанием.

4.3. Получение заготовок из жидкой фазы методами литья и сварки плавлением

Получение заготовок из жидкого состояния предполагает, как правило, расплавление основного и/или присадочного материала, заполнение специально подготовленной формы или зазора между соединяемыми элементами и кристаллизацию жидкой металлической фазы.

При литье заготовок на процесс затвердевания и образования кристаллической структуры существенно влияет температура заливки металла в форму и скорость охлаждения отливки.

Низкие температуры заливки металла, как правило, приводят к образованию мелкозернистой структуры, высокие – к получению крупных кристаллитов в заготовках.

Низкие скорости охлаждения отливки способствуют получению крупных дендритно-равноосных кристаллитов. С увеличением скорости охлаждения появляются зоны столбчатых кристаллитов. При очень большой скорости охлаждения расплава получается сплошная мелкая столбчатая структура большой плотности, для которой характерны высокие механические свойства.

Особенностью отливок, изготовленных с кристаллизацией под давлением (жидкой штамповкой), является отсутствие прибылей и литниковых систем. При этом усадка заготовок определяется свойствами сплава, схемой прессования, давлением и временем выдержки отливки под нагрузкой. Увеличение давления и времени прессования способствует уменьшению величины усадки отливки.

При сварке плавлением в результате расплавления кромок соединяемых элементов и присадочного материала образуется сварочная ванна. Этот

процесс является разновидностью литья заготовок в металлическую форму, поэтому кристаллизация шва в значительной степени напоминает формирование отливок. Размеры столбчатых кристаллитов зависят от способа и режимов сварки. Увеличение длительности существования сварочной ванны при высоких температурах, например в случае электрошлаковой сварки, вызывает заметное увеличение размеров кристаллитов в зоне шва и в зоне термического влияния.

Сущность процесса *наплавки* заключается в получении поверхностных слоев нанесением расплавленного присадочного материала методом сварки. Проплавление основного металла, перемешивание основного и наплавленного металлов должны быть минимальными для сохранения механических свойств наплавляемого слоя.

4.4. Получение заготовок пластическим деформированием

Технологические процессы обработки давлением, механической обработки резанием, сварки давлением и порошковой металлургии в твердом состоянии применяют с целью получения и обработки заготовок. Для их осуществления необходимо приложение термической, механической энергии и их сочетаний, которые приводят к изменению структуры, свойств и размеров изделий.

Обработка давлением основана на пластической деформации заготовки без ее разрушения и нарушения сплошности. В процессе резания происходит разрушение заготовки с разделением ее на части. В традиционном понимании механической обработки (точение, фрезерование, сверление и др.) меньшая часть представляет собой стружку, большая – обрабатываемую заготовку.

При разделительных технологических операциях обработки давлением, таких как вырубка, пробивка отверстий и разрезка на ножницах, разрушение заготовки сопровождается разделением ее на части, соизмеримые по размерам друг с другом.

Установить четкую грань между обработкой резанием и давлением достаточно сложно, поскольку для их осуществления необходима пластическая деформация заготовки. При этом в процессе резания заготовок и в условиях разделительных операций обработки давлением эти деформации всегда доведены до разрушения.

Сварка в твердом состоянии и изготовление заготовок методами порошковой металлургии обеспечивают получение требуемых свойств и заданной конфигурации изделий в результате образования межатомных или межмолекулярных связей на границе соединяемых элементов.

Термическая обработка заготовок, сопровождающая процессы горячей обработки давлением, сварки с использованием тепловой энергии и спекания порошков, оказывает существенное влияние на изменение их свойств.

В результате пластической деформации при получении заготовок и их обработке в твердом состоянии изменяются исходная структура и свойства материала. Кроме того, наличие механических надразов, трещин, внутренних

дефектов, сквозных отверстий, резких переходов от толстого сечения к тонкому приводит к неравномерному распределению напряжений.

Так как напряжения образуются в результате разных причин, различают *временные напряжения*, обусловленные действием внешней нагрузки и исчезающие после ее снятия, и *остаточные напряжения*, возникающие в заготовках после пластической деформации, при быстром нагреве или охлаждении в процессе сварки, обработки давлением и резанием вследствие неоднородного расширения (сжатия) различных слоев и зон изделия. Эти напряжения называют также *тепловыми*, или *термическими*.

Кроме того, вследствие неоднородного протекания фазовых превращений по объему заготовки возникают *фазовые*, или *структурные*, напряжения.

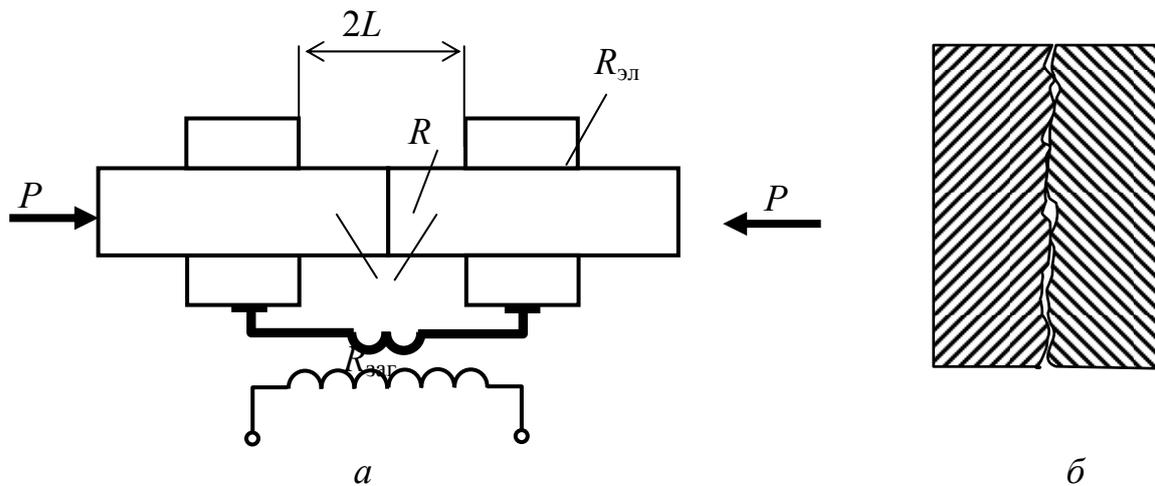


Рис. 4.1. Стыковая электроконтактная сварка сопротивлением:
а – схема; б – физический контакт на стыке заготовок

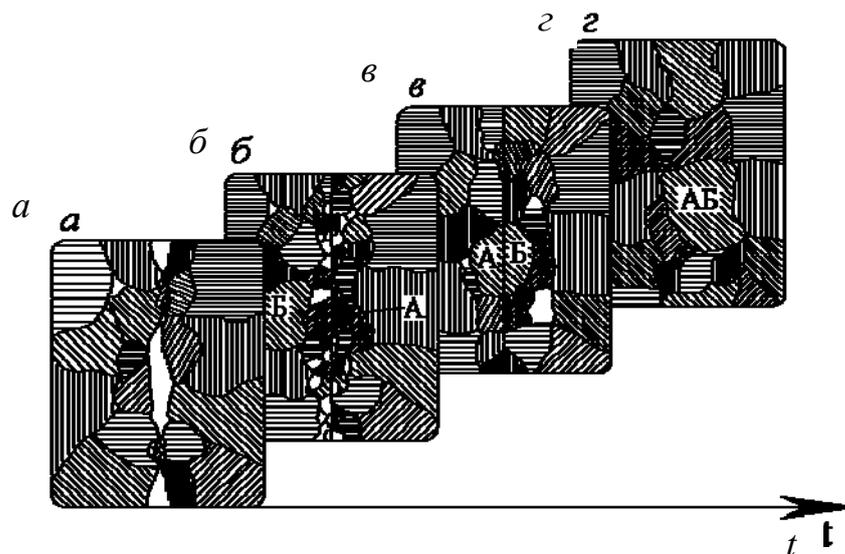


Рис. 4.2. Процесс постепенного формирования сварного соединения однородных заготовок при сварке давлением (в твердом состоянии): а – пластическая деформация микронеровностей; б – поверхностная деформация; в – создание активных центров и диффузионные процессы в зоне сварки; z – образование общих зерен

При сварке на соединяемых поверхностях заготовок и в прилегающих объемах металла, как правило, протекают следующие процессы: пластическая деформация, диффузия, упрочнение, рекристаллизация, формирование и разрушение оксидных пленок и др. Скорость образования сварных соединений определяется кинетикой процессов образования физического контакта и химического взаимодействия в объеме соединяемых элементов. Физический контакт обеспечивается пластической деформацией микронеровностей на соединяемых поверхностях ([рис. 4.1](#) и [рис. 4.2](#)).

Сглаживанию поверхностей могут способствовать процессы, не связанные с действием внешних сил. Скорость химического взаимодействия (образования связей) в основном зависит от скорости создания активных центров на сближаемых поверхностях и диффузионных процессов в зоне сварки ([рис. 4.2, в](#)).

В случае если длительность и температура процесса сварки в твердом состоянии достаточны для интенсивного развития диффузионных процессов, в зоне соединения образуются общие зерна или новые фазы. При сварке однородных элементов критерием окончания процесса может служить рекристаллизация, приводящая к образованию общих зерен в зоне контакта ([рис. 4.2, г](#)). Для получения соединений разнородных металлов необходимость развития или ограничения диффузии определяется свойствами образующихся фаз в зоне контакта.

4.5. Факторы, определяющие выбор метода получения заготовки

Метод получения той или иной заготовки зависит от служебного назначения детали и требований, предъявляемых к ней, а также от ее конфигурации и размеров, марки материала, типа производства и других факторов.

Наиболее сложные по конфигурации заготовки можно изготавливать методами литья. Изделия, получаемые методом обработки давлением, должны быть более простыми по форме. Изготовление в поковках отверстий и полостей объемной штамповкой в ряде случаев затруднено, а использование напусков резко увеличивает объем последующей механической обработки.

Размеры заготовок, получаемых методами литья и обработки давлением, практически не ограничиваются. Нередко определяющим параметром в этом случае являются минимальные размеры (например, минимальная толщина стенок отливки, минимальная масса поковки). Объемной штамповкой и большинством специальных способов литья получают заготовки массой до нескольких десятков или сотен килограммов.

Форма и размеры заготовок, получаемых методами порошковой металлургии, ограничены как максимальными, так и минимальными размерами. В процессе конструирования деталей выбор марки материала определяется не только условиями ее функционирования, но и условиями изготовления в реальном производстве. В то же время технологические свойства материала существенно влияют на выбор метода и способа

получения заготовок. Так, серый чугун имеет прекрасные литейные свойства, но обладает низкой деформируемостью и плохой свариваемостью.

Заготовки из одного и того же материала, полученные методами литья, обработки давлением и сваркой, обладают различными свойствами. Так, литой металл характеризуется большим размером зерен, неоднородностью химического состава и механических свойств по сечению отливки, наличием остаточных напряжений и т. д.

После обработки давлением заготовки имеют мелкозернистую структуру и определенную направленность расположения волокон (неметаллических включений). После холодной обработки давлением возникает наклеп, поэтому холоднокатаный металл прочнее литого в 1,5–3 раза. Пластическая деформация металла приводит к анизотропии свойств: прочность вдоль волокон (неметаллических включений) примерно на 10–15 % выше, чем в поперечном направлении.

Сварка приводит к образованию неоднородных структур в сварном шве и в околошовной зоне. Неоднородность зависит от вида и режима сварки. Так, наиболее резкое отличие в свойствах сварного шва возникает при ручной сварке, а электрошлаковая и автоматическая дуговая сварка обеспечивает формирование наиболее качественных однородных швов.

Программа выпуска продукции, т. е. количество изделий, выпускаемых в течение определенного времени (обычно за год), является одним из важнейших факторов, определяющих выбор метода и способа производства заготовок.

В условиях единичного производства и для простых по конфигурации деталей часто заготовками являются профили (сортовой прокат, трубы и т. п.), получаемые в условиях металлургического производства. Стоимость механической обработки заготовок при изготовлении деталей в этом случае высока, однако такая заготовка может быть достаточно экономичной из-за низкой стоимости проката, почти полного отсутствия подготовительных операций и возможности автоматизации процесса механической обработки.

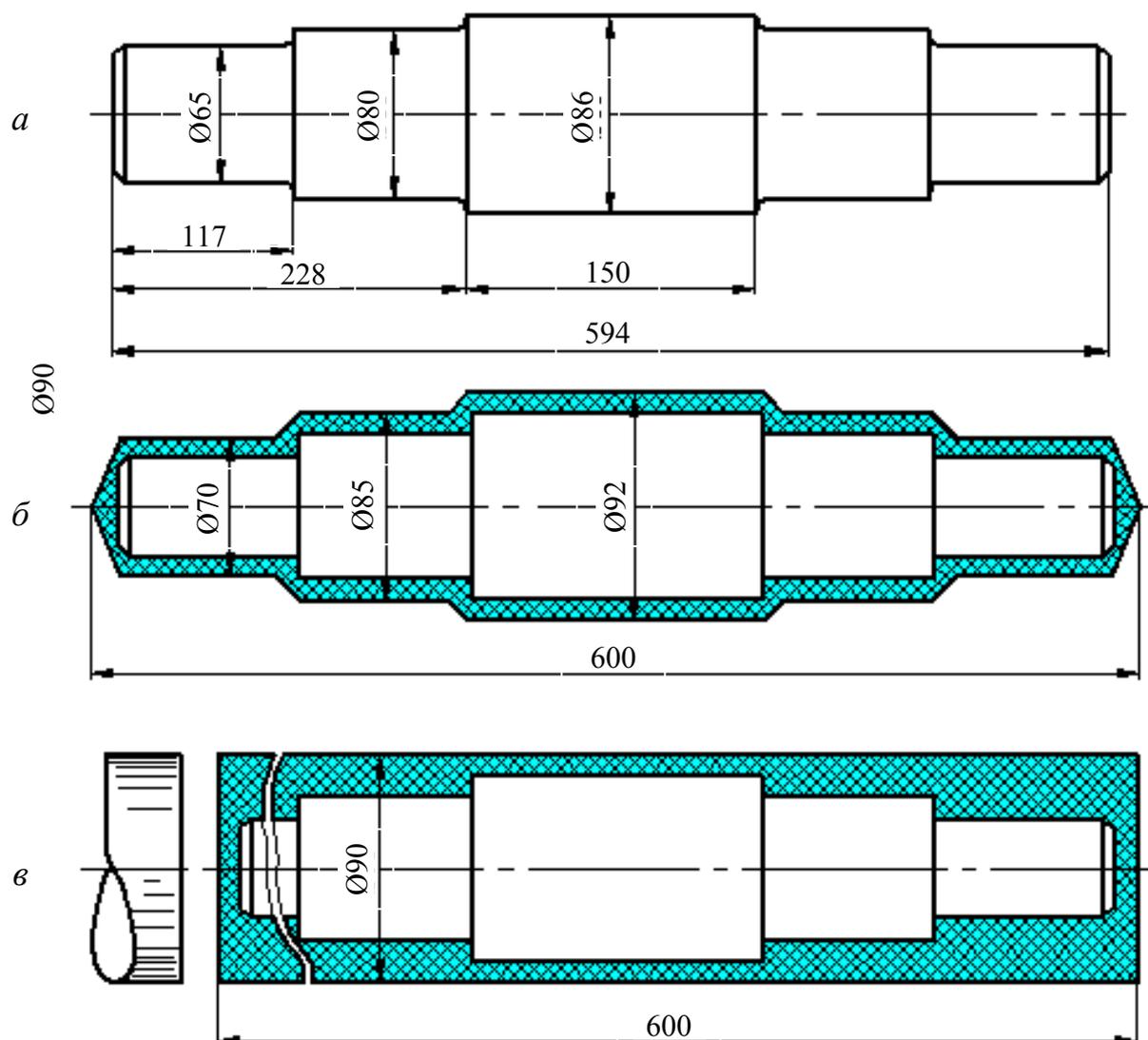


Рис. 4.3. Вал ступенчатый: *а* – деталь; *б* – штампованная поковка; *в* – заготовка из горячекатаного проката

При крупносерийном и массовом производстве конструкции заготовок следует максимально приближать к конфигурациям деталей. Например, для изготовления ступенчатого вала из стали 45 (рис. 4.3) целесообразно применить поковку, получаемую объемной штамповкой.

Наиболее эффективными технологическими способами изготовления заготовок в крупносерийном и массовом производстве являются специальные виды прокатки (поперечно-винтовая, поперечно-клиновья, прокатка в винтовых калибрах), которые позволяют получить периодические профили. Применение таких заготовок дает возможность повысить коэффициент использования материала и производительность труда.

При конструировании деталей необходимо учитывать возможности предприятия, на котором предполагается их изготовление. Для этого необходимо располагать сведениями о типе и количестве имеющегося

оборудования, производственных площадях, возможностях ремонтной базы, вспомогательных служб и т. д.

В соответствии с эскизом детали, полученной на основе расчетов, выбор метода изготовления заготовки осуществляется с учетом рассмотренных факторов, которые целесообразно располагать в порядке убывания их значимости. Анализируя степень влияния рассмотренных выше факторов, выбирают один или несколько методов, обеспечивающих получение заготовок требуемого качества.

Оптимальный метод изготовления заготовки определяют на основе анализа конструктивно-технологических признаков проектируемой детали, технико-экономических показателей способов и программы выпуска деталей. Затем конструируют заготовку с учетом оптимальной технологии ее изготовления.

ГЛАВА 5. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО – СПОСОБ ПЕРВИЧНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЖИДКОПОДВИЖНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Кристаллизация металлов

5.1.1. Физическая сущность процесса

Основной причиной и движущей силой процесса кристаллизации является стремление вещества к наиболее устойчивому в термодинамическом отношении состоянию, т. е. к наименьшему запасу свободной энергии.

Изменение величины свободной энергии в зависимости от температуры для металла в кристаллизованном и жидком состояниях схематически показано на [рис. 5.1](#). При температуре T_0 свободные энергии F обоих состояний равны. Такую температуру называют *равновесной* или *теоретической температурой кристаллизации*. При T_0 обе фазы (жидкая и твердая) могут сосуществовать одновременно и бесконечно долго: процесс кристаллизации при этой температуре еще не начинается.

Разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации называется *степенью переохлаждения* ΔT :

$$\Delta T = T_0 - T_{кр.}$$

Определение температур критических точек плавления и кристаллизации осуществляют при медленных нагреваниях и охлаждениях, т. е. в равновесном состоянии. Эти процессы изображают с помощью кривых нагревания ([рис. 5.2](#)) и охлаждения ([рис. 5.3](#)).

При нагреве всех кристаллических тел, в том числе металлов, наблюдается четкая граница перехода из твердого состояния в жидкое ([рис. 5.2](#)). Такая же резкая граница существует и при переходе из жидкого состояния в твердое ([рис. 5.3](#)).

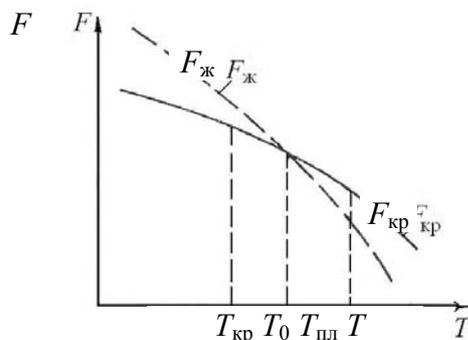


Рис. 5.1. Изменение свободной энергии F жидкого и кристаллизованного металла в зависимости от температуры T

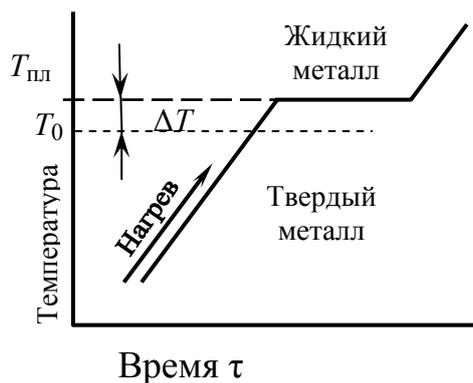


Рис. 5.2. Кривая нагревания

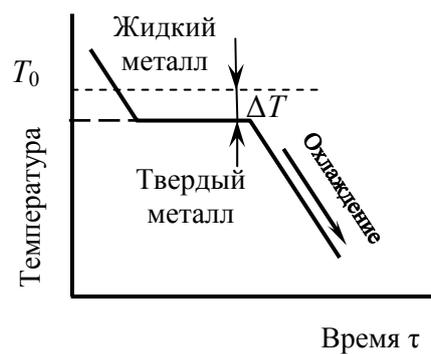


Рис. 5.3. Кривая охлаждения

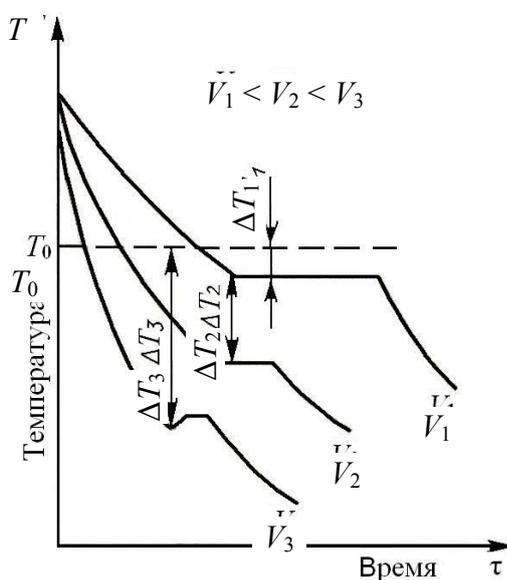


Рис. 5.4. Кривые охлаждения в случае кристаллизации металла при различных степенях переохлаждения

На кривой нагревания внешний подвод тепла сопровождается повышением температуры металла, сохраняющего свою кристаллическую решетку. На горизонтальном участке кривой нагрева подвод тепла продолжается, но он не приводит к повышению температуры, т. е. подводимая энергия целиком расходуется на разрушение закономерного расположения атомов. Внешне это проявляется в переходе твердого состояния в жидкое. После разрушения последних участков кристаллической решетки продолжающийся подвод тепла вызывает повышение температуры жидкого металла.

При охлаждении происходит обратный процесс. Горизонтальный участок кривой охлаждения показывает, что происходит кристаллизация, сопровождающаяся выделением тепла, которое называется *скрытой теплотой кристаллизации*. Кристаллизация металла происходит при некотором переохлаждении.

лаждении ΔT , величина которого зависит от природы самого металла, от степени его загрязненности различными включениями и от скорости охлаждения.

Кривые охлаждения, характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разной скоростью, приведены на [рис. 5.4](#). При очень медленном охлаждении степень переохлаждения невелика и процесс кристаллизации протекает при температуре, близкой к равновесной ([рис. 5.4](#), кривая V_1).

С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (кривые V_2, V_3) и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих ниже равновесной температуры кристаллизации. Чем чище жидкий металл, тем более он склонен к переохлаждению. При затвердевании очень чистых металлов степень переохлаждения ΔT может быть очень велика.

Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается в процессе роста их числа и размеров. Вокруг образовавшихся центров начинают расти кристаллы ([рис. 5.5, а](#)). Каждый из растущих новых кристаллов ориентирован в пространстве произвольно ([рис. 5.5, б, в](#)). При уменьшении количества жидкости поверхности растущих кристаллов соприкасаются друг с другом, их правильная внешняя форма нарушается и получается произвольной ([рис. 5.5, г](#)). Кристаллы с неправильной внешней формой называются *зернами* или *кристаллитами* ([рис. 5.5, г](#)). Твердые тела, в том числе и металлы, состоящие из большого количества зерен, называют *поликристаллическими*.

Таким образом, процесс кристаллизации состоит из двух этапов:

- 1) образование центров кристаллизации (зародышей);
- 2) рост кристаллов вокруг этих центров.

Установлена зависимость числа центров кристаллизации (ч. ц.) и скорости роста кристаллов (с. к.) от степени переохлаждения ΔT ([рис. 5.6](#)). Каждый из этих параметров изменяется по закону кривых распределения, т. е. число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов, возрастая с увеличением степени переохлаждения, имеют максимум. Размер образовавшихся кристаллов зависит от соотношения числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов при температуре кристаллизации, т. е. от степени переохлаждения.

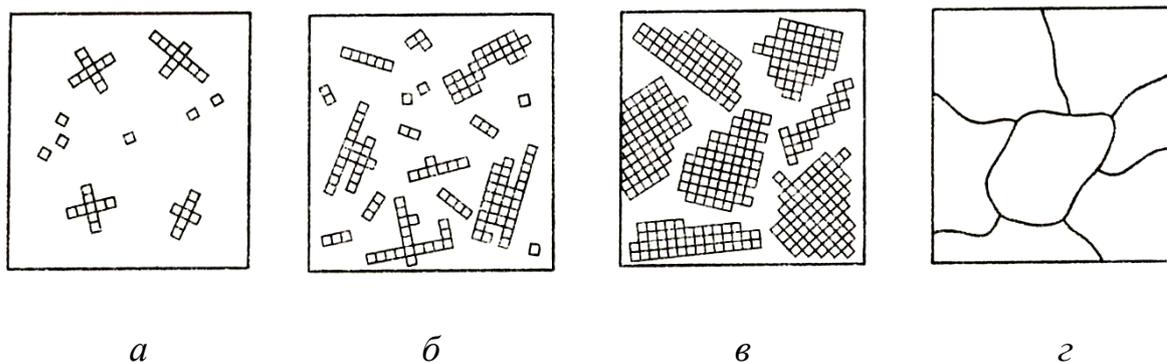


Рис. 5.5. Схемы процесса кристаллизации металла

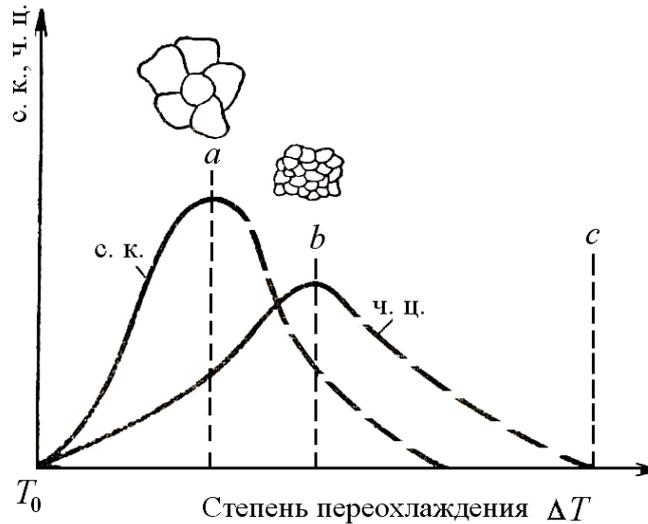


Рис. 5.6. Зависимость параметров кристаллизации от степени переохлаждения:
 ч. ц. – число центров кристаллизации, образующихся в единицу времени;
 с. к. – скорость роста кристаллов

При равновесной температуре T_0 число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов равны нулю, процесса кристаллизации не происходит. Если жидкость переохладить до температуры, соответствующей точке a , то образуются крупные зерна (рис. 5.6). При переохлаждении, соответствующей точке b , образуется мелкое зерно, так как в этом случае скорость роста кристаллов незначительная, а центров кристаллизации много. Если очень сильно переохладить жидкость (точка c на рис. 5.6), то число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов становятся равными нулю, жидкость не кристаллизуется. Образуется аморфное тело.

Кроме тепловых процессов на кинетику процесса кристаллизации, на количество и размеры кристаллизующихся зерен оказывают влияние вторичные факторы. К ним относится случайное наличие в расплаве жидкости посторонних нерастворимых частиц (из шихтовых материалов) или их специальное введение (модифицирование), а также действие ультразвука или механической вибрации.

Кристаллизация без каких-либо посторонних воздействий или без наличия готовых центров кристаллизации называется *самопроизвольной*, при наличии готовых центров – *несамопроизвольной*.

Чистые металлы применяют в технике очень редко в связи с тем, что они в большинстве случаев не могут обеспечить необходимых механических и физических свойств, которые удастся получить в сплавах.

Металлический сплав образуется в результате взаимодействия двух или нескольких химических элементов. Он обладает металлическими свойствами, отличающимися от свойств исходных компонентов.

Сплавы можно получить методом сплавления, порошковой металлургией, диффузией, осаждением из газовой среды различных металлов и неметаллов.

5.1.2. Кристаллизация сплавов

Дадим определения некоторым металлографическим понятиям.

Компонентами сплава называют химические элементы, входящие в его состав.

Однородная часть сплава, имеющая одинаковый состав, строение, агрегатное состояние, при этом отделенная от остальных частей сплава поверхностью раздела, называется *фазой*.

Системой называется совокупность фаз в сплаве, находящихся в состоянии стабильного или метастабильного равновесия.

Система может быть простой или сложной. Простая система состоит из одного компонента. Сложная система включает в себя два или более компонентов. Например, система Pb–Sb является двойной, система Al–Cu–Mn – тройной и т. д. Система может быть однородной (однофазной), например вода (жидкость), и неоднородной, состоящей из двух или трех фаз, например вода, лед (жидкость + твердое тело) или пар, вода, лед (жидкость + твердое тело + газ).

Фазовое состояние системы, составленной из двух компонентов, в зависимости от внешних условий может характеризоваться диаграммой состояния. Система называется *равновесной*, если в ней изменение фазового состояния при изменении внешних условий совершается обратимо, т. е. когда процессы при изменении состояния системы в одном направлении в точности возмещаются процессами, происходящими при изменении системы в обратном направлении.

Структурная составляющая – это однородная составляющая системы, состоящая из одной или нескольких фаз, имеющая характерное регулярное строение, форму и одинаковый средний химический состав.

Выделение из кристаллов твердой фазы других твердых фаз по мере охлаждения сплава называется *вторичной кристаллизацией*.

В сплаве могут образовываться следующие кристаллические фазы: твердые растворы и промежуточные фазы.

Твердые растворы – это кристаллы, образовавшиеся при распределении атомов одного компонента в кристаллической решетке другого. Один компонент (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, другой (растворяемый) отдает свои атомы в решетку растворителя. Вокруг атома растворенного элемента возникают местные искажения пространственной решетки, это приводит к изменению ее периода и свойств.

Твердые растворы обозначают буквами греческого алфавита α , β , γ .

Различают твердые растворы замещения и внедрения ([рис. 5.7](#)). Образование твердых растворов *замещения* сопровождается заменой атомов растворителя в его кристаллической решетке на атомы растворенного компонента. Это происходит, если размеры атомов обоих компонентов различаются незначительно.

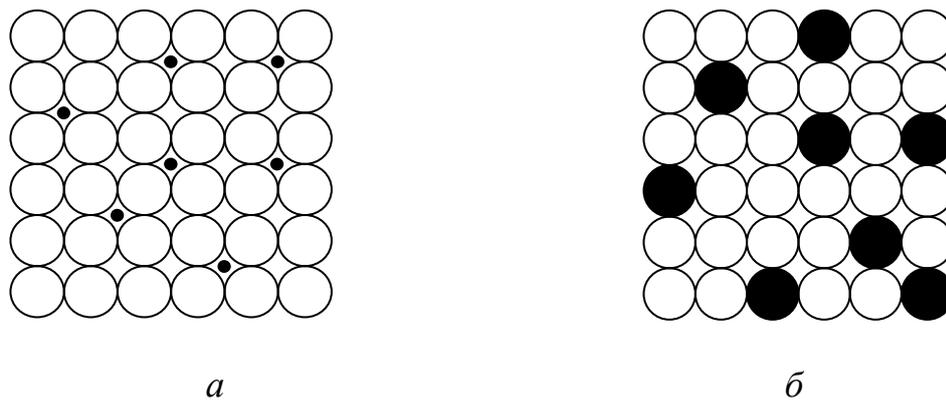


Рис. 5.7. Атомно-кристаллическая структура твердого раствора:
a – внедрения; *б* – замещения

Твердые растворы *внедрения* образуются при размещении атомов растворенного компонента в порах кристаллической решетки растворителя между атомами основного металла. Размеры атомов растворенного компонента (азота, водорода, углерода) значительно меньше атомов растворителя.

Состав твердого раствора, т. е. количество атомов растворенного компонента и растворителя, может меняться. Максимальное число (предельная концентрация) атомов растворенного компонента, которое может находиться в решетке растворителя, определяет предельную растворимость одного компонента в другом.

Растворимость элементов, часто с понижением температуры, уменьшается при увеличении различия их атомных радиусов и их валентности. Твердые растворы внедрения имеют ограниченную растворимость (рис. 5.7, *a*), а твердые растворы замещения могут быть с ограниченной (рис. 5.7, *б*) и с неограниченной растворимостью.

Кристаллы, образованные различными элементами и имеющие собственный тип кристаллической решетки, отличающийся от решеток составляющих их элементов, называют *промежуточной фазой*. Свойства последней резко отличаются от свойств исходных компонентов.

Промежуточные фазы могут иметь постоянный и переменный состав. Промежуточные фазы *постоянного состава* – химические соединения компонентов с кратным массовым соотношением элементов. Это позволяет выразить их состав формулой A_mB_n (*A* и *B* – компоненты, образующие сплав; *m* и *n* – простые числа) и постоянной температурой плавления (диссоциации).

Промежуточные фазы *переменного состава*, как и твердые растворы, являются кристаллами с переменной концентрацией компонентов. Переменный состав объясняется либо наличием небольших межузельных атомов в кристаллической решетке промежуточной фазы, либо недостатком атомов в узлах решетки.

Промежуточные фазы можно обозначать буквами греческого алфавита или химическими формулами, хотя промежуточные фазы переменного состава отличаются от типичных химических соединений, так как не подчиняются законам валентности. При сплавлении образуются промежуточные

электронные фазы. Например, при электронной концентрации $3/2$, $21/13$, $7/4$ фазам β , γ , ϵ в сплавах Cu–Zn соответствуют формулы CuZn , Cu_5Zn_8 , CuZn_3 .

5.1.3. Форма кристаллов и строение слитков

Форма и размер зерен, образующихся при кристаллизации, зависят от условий их роста, главным образом от скорости и направления отвода теплоты и температуры жидкого металла, а также от содержания примесей.

Рост зерна происходит по *дендритной* (древовидной) схеме, представленной на [рис. 5.8](#). Установлено, что максимальная скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называются осями первого порядка 1 . По мере роста на осях первого порядка появляются и начинают расти ветви второго порядка 2 , от которых ответвляются оси третьего порядка 3 и т. д. В последнюю очередь идет кристаллизация в участках между осями дендритов.

Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся между собой. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой. Такие кристаллы называют *зернами* или *кристаллитами*.

При недостатке жидкого металла для заполнения межосных пространств (например, на открытой поверхности слитка или в усадочной раковине) кристалл сохраняет дендритную форму. На границах между зернами в участках между осями дендритов накапливаются примеси.

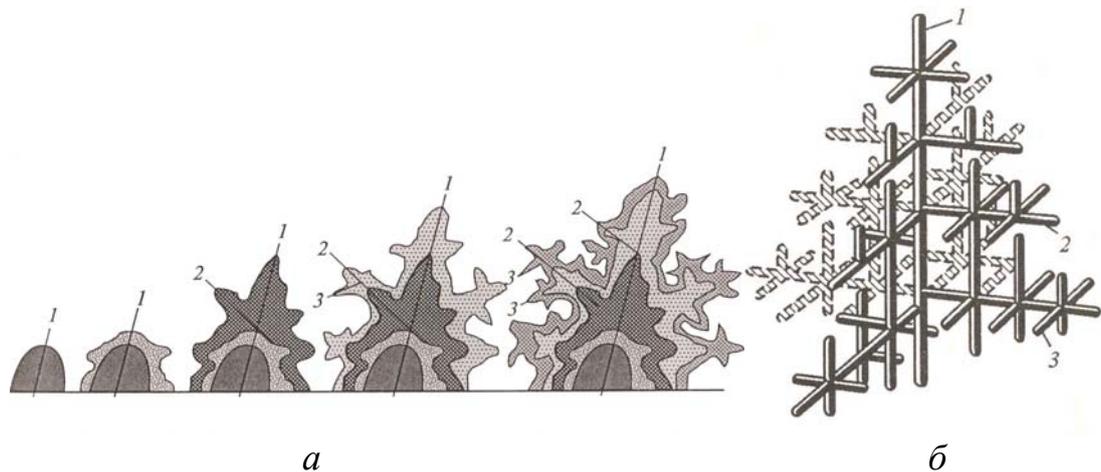


Рис. 5.8. Схемы образования и строения дендритов

Химическая неоднородность, или *ликвация*, возникает вследствие уменьшения растворимости примесей в металле, при его переходе из жидкого состояния в твердое. Кроме того, между осями дендритов появляются поры из-за усадки и трудностей подхода жидкого металла к фронту кристаллизации.

Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Кристаллы растут преимущественно в направлении, обратном отводу теплоты. Поэтому при направленном теплоотводе образуются вытянутые (столбчатые) кристаллы. Если теплота от растущего кристалла отводится во всех трех направлениях с приблизительно одинаковой скоростью, формируются равноосные кристаллы.

Структура слитка зависит от многих факторов, основные из которых следующие: количество и свойства примесей в чистом металле или легирующих элементов в сплаве, температура разливки, скорость охлаждения при кристаллизации, а также конфигурация, температура, теплопроводность, состояние внутренней поверхности литейной формы. На [рис. 5.9](#) приведены схемы макроструктур слитков, полученных в простой вертикальной металлической форме.

Типичная структура слитка сплавов, приведенная на [рис. 5.9, а](#), состоит из трех зон. Жидкий металл прежде всего переохлаждается в местах соприкосновения с холодными стенками формы. Большая степень переохлаждения способствует образованию на поверхности слитка зоны 1 мелких равноосных кристаллов. Отсутствие направленного роста кристаллов этой зоны объясняется их случайной ориентацией, которая является причиной столкновения кристаллов и прекращения их роста. Ориентация кристаллов, в свою очередь, зависит от состояния поверхности формы (шероховатость, адсорбированные газы, влага) и наличия в жидком металле оксидов, неметаллических включений. Эта зона очень тонка и не всегда различима невооруженным глазом.

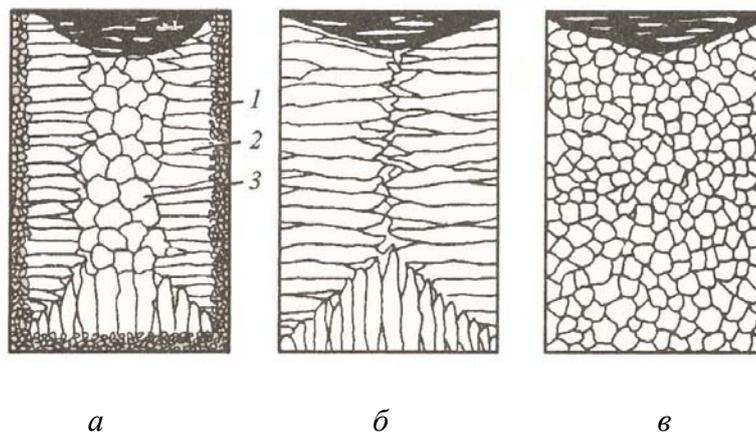


Рис. 5.9. Схемы макроструктур слитков: *а* – типичная; *б* – транскристаллическая; *в* – однородная мелкозернистая

Затем происходит преимущественный рост кристаллов, наиболее благоприятно ориентированных по отношению к теплоотводу. Так образуется зона 2 ([рис. 5.9, а](#)) столбчатых кристаллов, расположенных нормально к стенкам формы. Наконец, в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения и не ощущается направленный отвод теплоты, образуются равноосные кристаллы больших размеров (зона 3 на [рис. 5.9, а](#)).

Применяя различные технологические приемы, можно изменить количественное соотношение зон или исключить из структуры слитка какую-либо зону вообще. Например, перегрев сплавов перед разливкой и быстрое охлаждение при кристаллизации приводят к формированию структуры, состоящей практически из одних столбчатых кристаллов (рис. 5.9, б). Такая структура называется *транскристаллической*. Подобную структуру имеют слитки очень чистых металлов. Зона столбчатых кристаллов характеризуется наибольшей плотностью, но в месте стыка столбчатых кристаллов собираются нерастворимые примеси и слитки с транскристаллической структурой часто растрескиваются при обработке давлением. Транскристаллическая структура, образуясь в сварных швах, уменьшает их прочность.

Низкая температура разливки сплавов, продувка жидкого металла инертными газами, вибрация, модифицирование приводят к уменьшению и даже исчезновению зоны столбчатых кристаллов и получению слитков со структурой, состоящей из равноосных кристаллов (рис. 5.9, в).

В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, концентрируется усадочная раковина. Под усадочной раковиной металл получается рыхлым, в нем содержится много усадочных пор. Часть слитка с усадочной раковиной и рыхлым металлом отрезают.

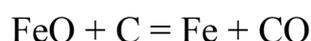
Качественная структура формируется при непрерывной разливке. В этом случае жидкий металл поступает из печи через специальное устройство непосредственно в водоохлаждаемый кристаллизатор, а затвердевший металл непрерывно вытягивается с противоположного конца кристаллизатора. При этом литой металл отличается высокой пластичностью и мелко-зернистой структурой, приближаясь по качеству к деформированному металлу. Применение этого способа разливки позволяет автоматизировать и механизировать технологический процесс, сократить производственные площади, полностью исключить применение изложниц, разгрузить обжимное оборудование, облегчить труд обслуживающего персонала, увеличить выход годного металла вследствие заполнения жидким металлом усадочной раковины. Все это приводит к уменьшению себестоимости металла.

Строение стальных слитков. На строение стального слитка большое влияние оказывает степень раскисления стали.

По степени раскисления и характеру затвердевания стали классифицируют на спокойные, полуспокойные и кипящие.

Раскисление проводится для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации. Для раскисления кремний и марганец вводят в сталь в виде ферросплавов, алюминий – в чистом виде.

Кипящие стали раскисляют только ферромарганцем. В таких сталях остается растворенный FeO и при кристаллизации продолжается процесс кипения по реакции



Перед разливкой кипящие стали содержат повышенное количество кислорода, который удаляется в виде CO. Выделение пузырей CO создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название.

Кипящие стали дешевы. Их производят низкоуглеродистыми и практически без кремния ($Si \leq 0,07 \%$), но с повышенным количеством газообразных примесей. Газовые пузыри остаются в теле слитка и завариваются при последующей прокатке. Кипящая сталь дает наиболее высокий выход годного металла.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Спокойная сталь (рис. 5.10, а, з) содержит мало кислорода и затвердевает без выделения газов, в верхней части слитка образуется усадочная раковина I, а в средней – усадочная осевая рыхлость.

Для устранения усадочных дефектов слитки спокойной стали отливают с прибылью, которая образуется с помощью надставки на изложницу. Стенки надставки футерованы огнеупорной массой малой теплопроводности. Поэтому сталь в прибыли долгое время остается жидкой и питает слиток, а усадочная раковина располагается в прибыли.

Стальные слитки неоднородны по химическому составу. *Дендритная ликвация* – неоднородность состава стали в пределах одного кристалла (дендрита) – центральной оси и ветвей. Например, при кристаллизации стали содержание серы на границах дендрита по сравнению с содержанием в центре увеличивается в 2 раза, фосфора – в 1,2 раза, а углерода уменьшается почти в 2 раза.

Зональная ликвация – неоднородность состава стали в различных частях слитка. В верхней части слитка из-за конвекции жидкого металла содержание серы, фосфора и углерода увеличивается в несколько раз (рис. 5.10, з), а в нижней части – уменьшается. Зональная ликвация приводит к отбраковке металла вследствие отклонения его свойств от заданных. Поэтому прибыльную и подприбыльную части слитка, а также его донную часть при прокатке отрезают.

В слитках кипящей стали (рис. 5.10, б, д) не образуется усадочная раковина: усадка стали рассредоточена по полостям газовых пузырей, возникающих при кипении стали в изложнице. При прокатке слитка газовые пузыри завариваются. Кипение стали влияет на зональную ликвацию в слитках, которая развита в них больше, чем в слитках спокойной стали. Углерод, сера и фосфор потоком металла выносятся в верхнюю часть слитка, так как в донной ликвация мала. Для уменьшения ликвации кипение после заполнения изложницы прекращают, накрывая слиток металлической крышкой («механическое закупоривание»), либо раскисляют металл алюминием или ферросилицием в верхней части слитка («химическое закупоривание»).

Слиток кипящей стали имеет следующее строение (рис. 5.10, б): плотную наружную корку А без пузырей, из мелких кристаллитов; зону сотовых пузырей П, вытянутых к оси слитка и располагающихся между кристаллитами Б; зону В неориентированных кристаллов; промежуточную

зону С; зону вторичных круглых пузырей К и среднюю зону Д с отдельными пузырями, которых больше в верхней части слитка.

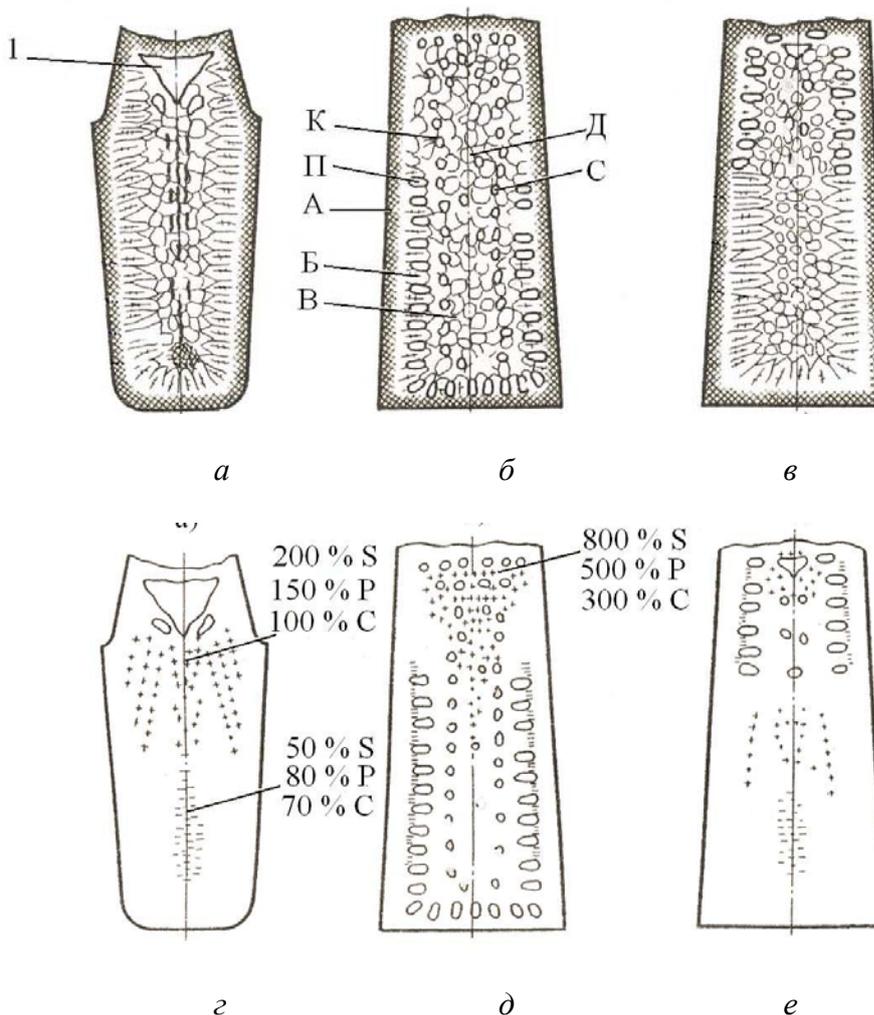


Рис. 5.10. Схема строения стальных слитков

Полуспокойная сталь (рис. 5.10, в, е) частично раскисляется в печи и ковше, а частично – в изложнице. Слиток полуспокойной стали имеет в нижней части структуру спокойной стали, в верхней – кипящей. Ликвация в верхней части слитков полуспокойной стали меньше, чем у кипящей, и близка к ликвации спокойной стали. Слитки полуспокойной стали не имеют усадочной раковины.

5.2. Сущность и значение технологического процесса формообразования методами литья

Литейным производством называется технологический процесс получения фасонных деталей или заготовок путем заливки расплавленного металла в формы. После затвердевания металла в форме получается отливка,

служащая, как правило, заготовкой для изготовления детали.

Отливки получают из черных металлов и сплавов (стали, серого и ковкого чугуна), а также из цветных металлов и сплавов (алюминиевых, магниевых, медных – бронзы, латуни и т. д.). Детали из них составляют от 25 до 90 % веса отдельных машин. Литьем изготавливают как простые, так и самые сложные детали автомобилей, тракторов (поршни, поршневые кольца, гильзы и блоки цилиндров двигателей, корпуса насосов, компрессоров, коробки передач, шестерни и др.), металлорежущих станков, прокатных станов и т. д.

Метод литья является универсальным: используя его, можно изготавливать изделия весьма сложной конфигурации, которые при помощи других видов обработок –ковки, штамповки, сварки – получить или значительно труднее, или невозможно. Стоимость литой детали в большинстве случаев оказывается ниже стоимости аналогичной детали, изготовленной другими методами.

Для изготовления отливок применяют различные способы литья: в песчаные формы, в оболочковые формы, литье по выплавляемым моделям, в кокиль, под давлением, центробежное литье и др.

5.2.1. Классификация литых заготовок

По условиям эксплуатации, независимо от способа изготовления, различают отливки:

- *общего назначения*, т. е. отливки для деталей, не рассчитываемых на прочность;
- *ответственного назначения*, т. е. отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при статических нагрузках;
- *особо ответственного назначения*, т. е. отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при циклических и динамических нагрузках.

В зависимости от способа изготовления, массы, конфигурации поверхностей, габаритного размера, толщины стенок, количества стержней, назначения и особых технических требований отливки делят на 6 групп сложности.

В качестве примера рассмотрим отливки первой и шестой группы. Первая группа характеризуется гладкими и прямолинейными наружными поверхностями с наличием невысоких усиливающих ребер, буртов, фланцев. Внутренние поверхности имеют простую форму. Типовые детали – крышки, рукоятки, диски, фланцы, муфты, колеса вагонеток, маховики для вентиля и т. д.

Шестая группа – отливки с особо сложными закрытыми коробчатыми и цилиндрическими формами. На наружных криволинейных поверхностях под различными углами пересекаются ребра, кронштейны и фланцы. Внутренние полости имеют особо сложные конфигурации с затрудненными выходами на поверхность отливки. Типовые детали – станины специальных

металлорежущих станков (МРС), сложные корпуса центробежных насосов, детали воздуходувок, рабочие колеса гидротурбин.

В зависимости от способа изготовления типовых деталей, их габаритных размеров и типа сплавов ГОСТ 26645–85 устанавливает 22 класса точности.

5.2.2. Требования к литейным сплавам

Требования к материалам, используемым для получения отливок:

- состав материалов должен обеспечивать получение в отливке заданных физико-механических и физико-химических свойств; свойства и структура должны быть стабильными в течение всего срока эксплуатации отливки;
- материалы должны обладать хорошими литейными свойствами (высокой жидкотекучестью, небольшой усадкой, низкой склонностью к образованию трещин и поглощению газов, герметичностью), хорошо свариваться, легко обрабатываться режущим инструментом;
- материалы не должны быть токсичными и вредными для производства;
- материалы должны обеспечивать технологичность в условиях производства и быть экономичными.

5.2.3. Литейные свойства сплавов

Получение качественных отливок (без раковин, трещин и других дефектов) зависит от литейных свойств, которые проявляются при заполнении формы, кристаллизации и охлаждении отливок в форме. К основным литейным свойствам сплавов относят: жидкотекучесть, усадку сплавов, склонность к образованию трещин, газопоглощение, ликвацию.

Жидкотекучесть – способность расплавленного металла течь по каналам литейной формы, заполнять ее полости и четко воспроизводить контуры отливки.

При высокой жидкотекучести сплавы заполняют все элементы литейной формы.

Жидкотекучесть зависит от многих факторов: от температурного интервала кристаллизации, вязкости и поверхностного натяжения расплава, температуры заливки и формы, свойств формы и т. д.

Чистые металлы и сплавы, затвердевающие при постоянной температуре, обладают лучшей жидкотекучестью, чем сплавы, затвердевающие в интервале температур (твердые растворы). Чем выше вязкость, тем меньше жидкотекучесть. С увеличением поверхностного натяжения жидкотекучесть понижается. С повышением температуры заливки расплавленного металла и формы жидкотекучесть улучшается. Увеличение теплопроводности материала формы снижает жидкотекучесть. Так, песчаная форма отводит теплоту медленнее, и расплавленный металл заполняет ее лучше, чем металлическую форму. Наличие неметаллических включений снижает жидкотекучесть. На

жидкотекучесть влияет также химический состав сплава: с увеличением содержания серы, кислорода, хрома жидкотекучесть снижается; с увеличением содержания фосфора, кремния, алюминия, углерода жидкотекучесть увеличивается.

Усадка – свойство металлов и сплавов уменьшать объем при охлаждении в расплавленном состоянии, в процессе затвердевания и в затвердевшем состоянии при охлаждении до температуры окружающей среды. Изменение объема зависит от химического состава сплава, температуры заливки, конфигурации отливки.

Различают объемную и линейную усадку. В результате объемной усадки появляются усадочные раковины и усадочная пористость в массивных частях отливки. Для предупреждения образования усадочных раковин устанавливают прибыли – дополнительные резервуары с расплавленным металлом, а также наружные или внутренние холодильники.

Линейная усадка определяет размерную точность полученных отливок (поэтому она учитывается при разработке технологии литья и изготовления модельной оснастки) и составляет: для серого чугуна от 0,8 до 1,3 %; для углеродистых сталей от 2 до 2,4 %; для алюминиевых сплавов от 0,9 до 1,45 %; для медных сплавов от 1,4 до 2,3 %.

Газопоглощение – способность литейных сплавов в расплавленном состоянии растворять водород, азот, кислород и другие газы. Степень растворимости газов зависит от состояния сплава: увеличивается незначительно с повышением температуры твердого сплава; возрастает при плавлении; резко повышается при перегреве расплава. При затвердевании и последующем охлаждении растворимость газов уменьшается, в результате чего в отливке могут образоваться газовые раковины и поры.

Растворимость газов зависит от химического состава сплава, температуры заливки, вязкости сплава и свойств литейной формы.

5.3. Способы изготовления отливок

Для изготовления отливок служит литейная форма, представляющая собой систему элементов, образующих рабочую полость, при заливке которой расплавленным металлом формируется отливка.

Литейные формы изготавливают как из неметаллических материалов (песчаные формы; формы, изготавливаемые по выплавляемым моделям; оболочковые формы) для одноразового использования, так и из металлов (кокили, изложницы для центробежного литья) для многократного использования.

5.3.1. Изготовление отливок в песчаных формах

Литье в песчаные формы является самым распространенным способом изготовления отливок. Изготавливают отливки из чугуна, стали, цветных металлов от нескольких граммов до сотен тонн, с толщиной стенки от 3 до 1000 мм и длиной до 10 000 мм.

Схема технологического процесса изготовления отливок в песчаных формах представлена на [рис. 5.11](#).

Сущность литья в песчаные формы заключается в получении отливок из расплавленного металла, затвердевшего в формах, которые изготовлены из формовочных смесей путем уплотнения с использованием модельного комплекта.

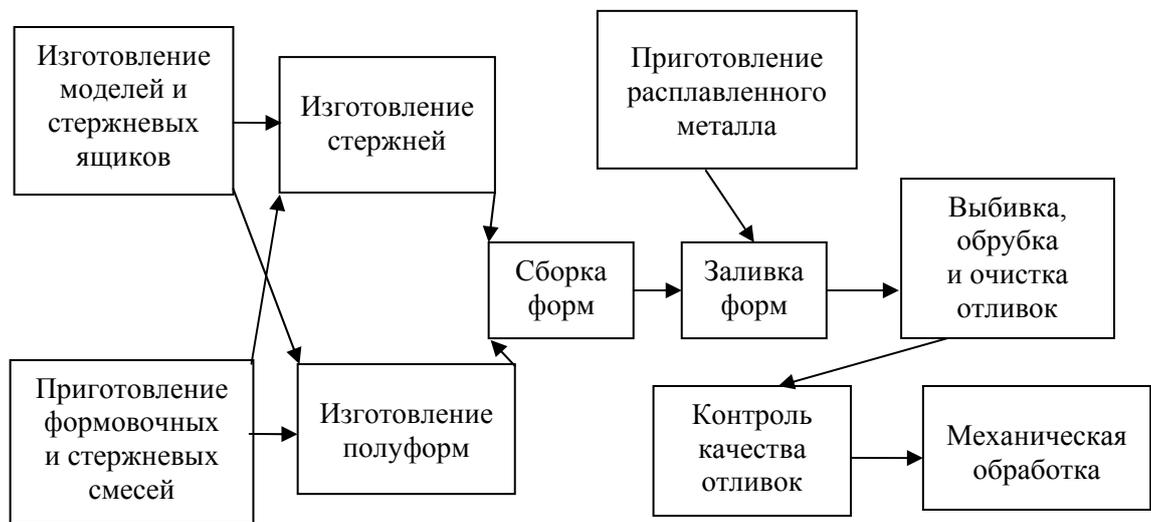


Рис. 5.11. Схема технологического процесса изготовления отливок в песчаных формах

Литейная форма для получения отливок в песчаных формах, представленная на [рис. 5.12](#), обычно состоит из верхней и нижней полуформ, которые изготавливаются в опоках 5 и 4, приспособлениях для удержания формовочной смеси 3.

Для образования полостей отверстий или иных сложных контуров в формы устанавливают литейные стержни 2, которые фиксируют посредством выступов, входящих в соответствующие впадины формы (знаки).

Литейную форму заливают расплавленным металлом через *литниковую систему* – совокупность каналов и резервуаров, по которым расплав поступает из разливочного ковша в полость формы 1. Основными элементами литниковой системы являются: литниковая чаша 9, которая служит для приема расплавленного металла и подачи его в форму; стояк 8 – вертикальный канал для подачи металла из литниковой чаши в рабочую полость или к другим элементам; шлакоуловитель 7, с помощью которого удерживается шлак и другие неметаллические примеси; питатель 6 (один или

несколько), через который расплавленный металл подводится в полость литейной формы.

Для вывода газов, контроля заполнения формы расплавленным металлом и питания отливки при ее затвердевании служат прибыли или выпоры 10. Для вывода газов предназначены и вентиляционные каналы 11.

Различают литниковые системы с питателями, расположенными в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

По способу подвода расплава в рабочую полость формы литниковые системы делят на нижнюю, верхнюю и боковую (рис. 5.13).

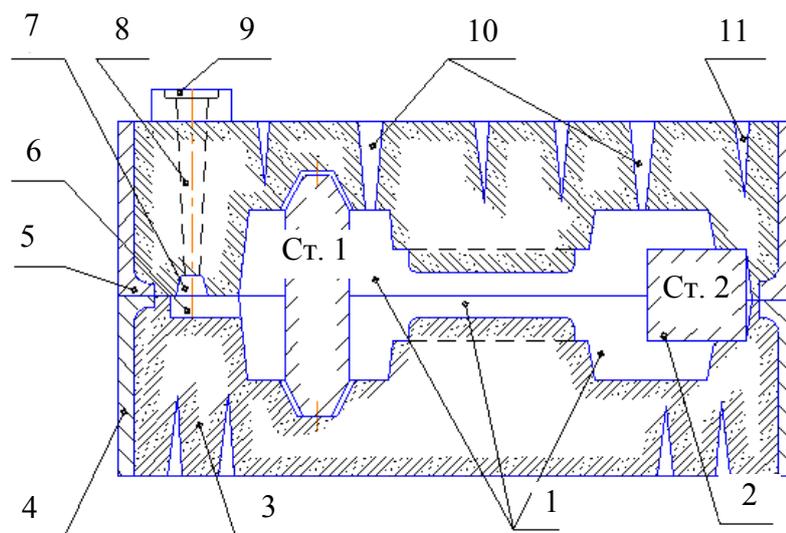


Рис. 5.12. Литейная форма для получения отливки рычага: 1 – полость формы; 2 – стержни; 3 – формовочная смесь; 4 – нижняя опока; 5 – верхняя опока; 6 – питатель; 7 – шлакоуловитель; 8 – стояк; 9 – литниковая чаша; 10 – выпоры; 11 – газоканалы

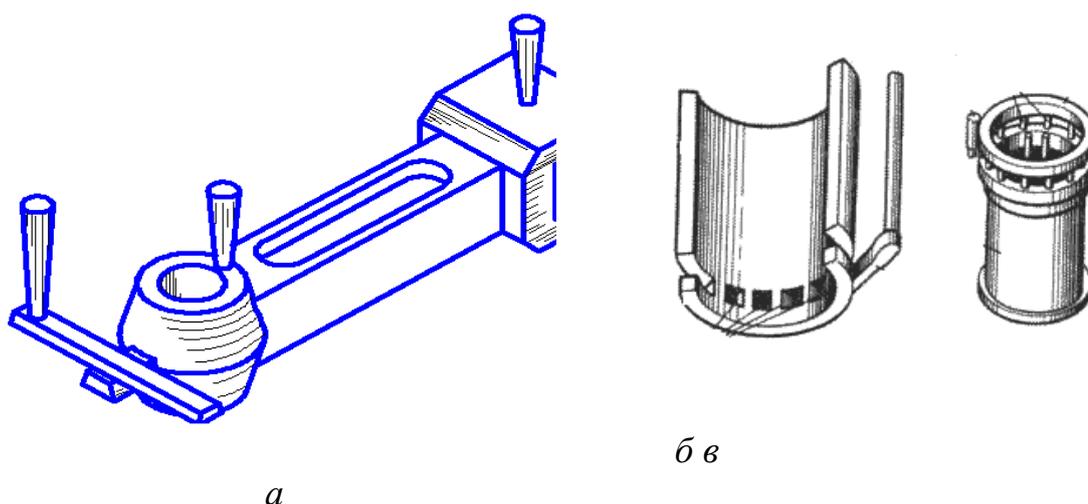


Рис. 5.13. Разновидности литниковых систем: а – боковая; б – нижняя; в – верхняя

Нижняя литниковая система (рис. 5.13, б) широко используется для литья сплавов, легко окисляющихся и насыщающихся газами (алюминий),

обеспечивает спокойный подвод расплава к рабочей полости формы и постепенное заполнение ее поступающим снизу, без открытой струи, металлом. При этом усложняется конструкция литниковой системы, увеличивается расход металла на нее, создается неблагоприятное распределение температур в залитой форме ввиду сильного разогрева ее нижней части, возможно образование усадочных дефектов и внутренних напряжений. При такой системе ограничена возможность получения высоких тонкостенных отливок (при литье алюминиевых сплавов форма не заполняется металлом, если отношение высоты отливки к толщине ее стенки превышает 60).

Нижний подвод через большое количество питателей часто используется при изготовлении сложных по форме крупных отливок из чугуна.

Верхняя литниковая система (рис. 5.13, в) применяется для невысоких (в положении заливки) отливок, небольшой массы и несложной формы, изготовленных из сплавов, не склонных к сильному окислению в расплавленном состоянии (чугуны, углеродистые конструкционные стали, латуни).

Достоинствами системы являются: малый расход металла; конструкция проста и легко выполняема при изготовлении форм; подача расплава сверху обеспечивает благоприятное распределение температуры в залитой форме (температура увеличивается от нижней части к верхней), а следовательно, и благоприятные условия для направленной кристаллизации и питания отливки.

Недостатками системы являются: падающая сверху струя, которая может размыть песчаную форму, вызывая засоры; при разбрызгивании расплава возникает опасность его окисления и замешивания воздуха в поток с образованием оксидных включений; затрудняется улавливание шлака.

Боковая литниковая система (рис. 5.13, а) применяется при получении отливок из различных сплавов, малых и средних по массе деталей, плоскость симметрии которых совпадает с плоскостью разреза формы. Является промежуточной между верхней и нижней и, следовательно, сочетает в себе некоторые их достоинства и недостатки. Подвод металла осуществляется в среднюю часть отливки (по разряду формы).

Иногда при подводе металла снизу и сверху используют массивные коллекторы.

5.3.2. Приготовление формовочных и стержневых смесей и их свойства

Для приготовления смесей используются природные и искусственные материалы.

Песок – основной компонент формовочных и стержневых смесей. Обычно используется кварцевый или цирконовый песок из кремнезема.

Огнеупорность – способность смеси и формы сопротивляться растяжению или расплавлению под действием температуры расплавленного металла.

Газопроницаемость – способность смеси пропускать через себя газы (песок способствует ее повышению).

Глина является связующим веществом, обеспечивающим прочность и пластичность, обладающим термической устойчивостью. Широко применяют бентонитовые и каолиновые глины.

Для предотвращения пригара и улучшения чистоты поверхности отливок используют противопригарные материалы: для сырых форм – припылы; для сухих форм – краски. В качестве припылов используют: для чугунных отливок – смесь оксида магния, древесного угля, порошкообразного графита; для стальных отливок – смесь оксида магния и огнеупорной глины, пылевидный кварц. Противопригарные краски представляют собой водные суспензии этих материалов с добавками связующих.

Смеси должны обладать рядом свойств:

- *прочность* – способность смеси обеспечивать сохранность формы без разрушения при изготовлении и эксплуатации;
- *поверхностная прочность* (осыпаемость) – сопротивление истирающему действию струи металла при заливке;
- *пластичность* – способность воспринимать очертание модели и сохранять полученную форму;
- *податливость* – способность смеси сокращаться в объеме под действием усадки сплава;
- *текучесть* – способность смеси обтекать модели при формовке, заполнять полость стержневого ящика;
- *термохимическая устойчивость*, или *непригарность*, – способность выдерживать высокую температуру сплава без оплавления или химического с ним взаимодействия;
- *негигроскопичность* – способность после сушки не поглощать влагу из воздуха;
- *долговечность* – способность сохранять свои свойства при многократном использовании.

Формовочные смеси. По характеру использования различают облицовочные, наполнительные и единые смеси.

Облицовочная смесь используется для изготовления рабочего слоя формы. Содержит повышенное количество исходных формовочных материалов и имеет высокие физико-механические свойства.

Наполнительная смесь используется для заполнения формы после нанесения на модель облицовочной смеси. Приготавливается путем переработки использованной (оборотной) смеси с малым количеством исходных формовочных материалов.

Облицовочная и наполнительная смеси необходимы для изготовления крупных и сложных отливок.

Единая смесь применяется одновременно в качестве облицовочной и наполнительной. Используют при машинной формовке и на автоматических линиях в серийном и массовом производстве. Изготавливается из наиболее

огнеупорных песков и глин с наибольшей связующей способностью для обеспечения долговечности.

Для приготовления формовочных смесей сначала подготавливают песок, глину и другие исходные материалы. Песок сушат и просеивают. Глину сушат, размельчают, размалывают в шаровых мельницах или бегунах и просеивают. Аналогично получают угольный порошок.

Подготавливают обратную смесь, которую после выбивки из опок разминают на гладких валках, очищают от металлических частиц в магнитном сепараторе и просеивают.

Приготовление формовочной смеси включает следующие операции: перемешивание компонентов смеси, увлажнение и разрыхление. Перемешивание осуществляется в смесителях-бегунах с вертикальными или горизонтальными катками. Песок, глину, воду и другие составляющие загружают в смесители-бегуны при помощи дозатора, перемешивание осуществляется под действием катков и плужков, подающих смесь под катки.

Готовую смесь выдерживают в бункерах-отстойниках в течение 2–5 ч (для распределения влаги и образования водных оболочек вокруг глинистых частиц), затем разрыхляют в специальных устройствах и подают на формовку.

Стержневые смеси соответствуют условиям технологического процесса изготовления литейных стержней, которые испытывают тепловые и механические воздействия. Они должны иметь более высокие огнеупорность, газопроницаемость, податливость, легко выбиваться из отливки.

В зависимости от способа изготовления стержней различают: смеси с отверждением стержней тепловой сушкой в нагреваемой оснастке; жидкие самотвердеющие; жидкие холоднотвердеющие смеси на синтетических смолах; жидкостекольные смеси, отверждаемые углекислым газом.

Приготовление стержневых смесей осуществляется перемешиванием компонентов в течение 5–12 мин с последующим выстаиванием в бункерах.

В современном литейном производстве смеси изготавливают на автоматических участках.

5.3.3. Модельный комплект

Модельный комплект – приспособления, включающие литейную модель, модели литниковой системы, стержневые ящики, модельные плиты, контрольные и сборочные шаблоны.

Литейная модель – приспособление, с помощью которого в литейной форме получают отпечаток, соответствующий наружной конфигурации и размерам отливки.

Применяют модели разъемные и неразъемные, деревянные, металлические и пластмассовые.

Размеры модели больше размеров отливки на величину линейной усадки сплава.

Модели деревянные (сосна, бук, ясень) лучше изготавливать не из целого куска, а склеивать из отдельных брусочков с разным направлением волокон, для предотвращения коробления. Их достоинства: дешевизна, простота изготовления, малый вес. Недостаток – недолговечность (рис. 5.14).

Для лучшего удаления модели из формы модель окрашивают: чугунную – в красный цвет, стальную – в синий.

Металлические модели характеризуются большей долговечностью, точностью и чистой рабочей поверхностью, изготавливаются из алюминиевых сплавов (легкие), не окисляются, хорошо обрабатываются. Для уменьшения массы модели делают пустотелыми с ребрами жесткости.

Модели из пластмасс устойчивы к действию влаги при эксплуатации и хранении, не подвергаются короблению, имеют малую массу.

Стержневой ящик – формообразующее изделие, имеющее рабочую полость для получения в ней литейного стержня нужных размеров и очертаний из стержневой смеси (рис. 5.15). Он обеспечивает равномерное уплотнение смеси и быстрое извлечение стержня.

Стержневые ящики изготавливают из тех же материалов, что и модели. Они могут быть разъемными и неразъемными (вытряхными), иногда с нагревателями.

Изготовление стержней может осуществляться вручную и на специальных стержневых машинах.

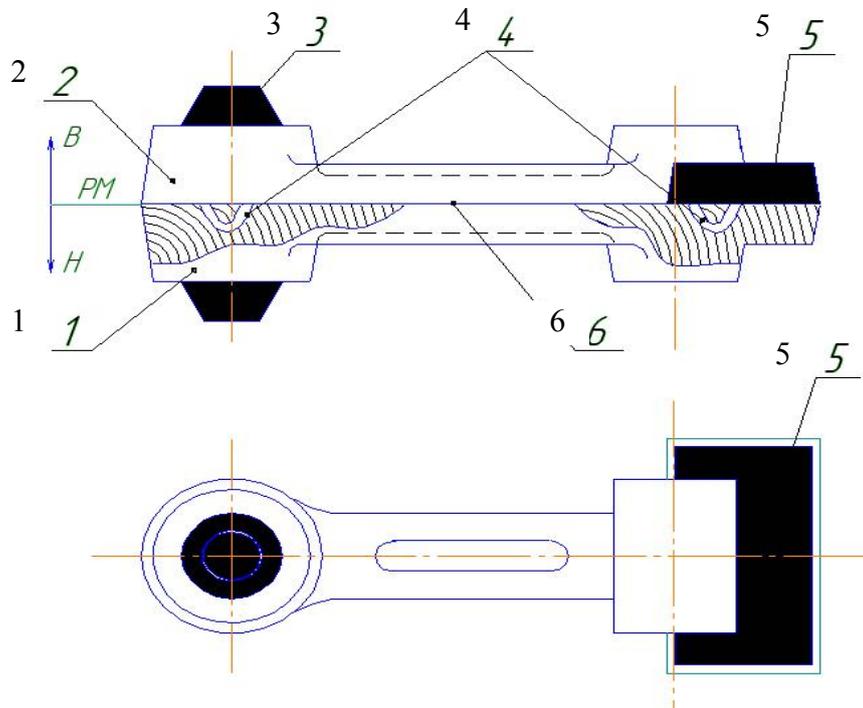


Рис. 5.14. Модель отливки рычага: 1 – нижняя часть модели; 2 – верхняя часть модели; 3, 5 – стержневые знаки; 4 – соединительные штыри; 6 – плоскость разъема модели

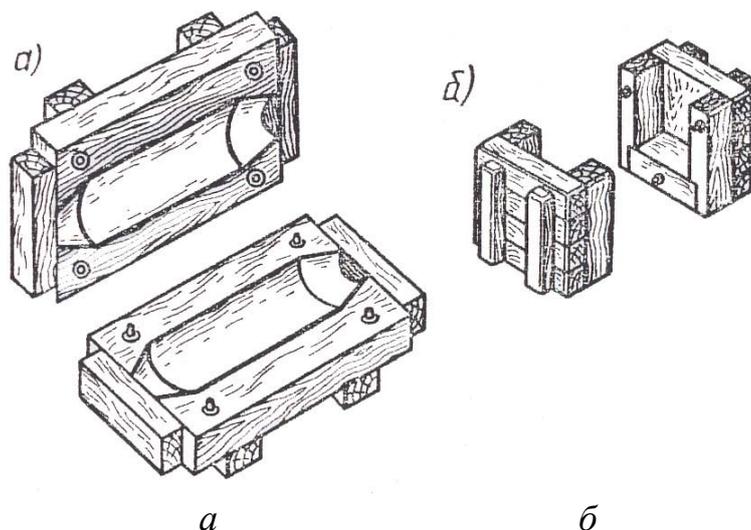


Рис. 5.15. Деревянные стержневые ящики: *а* – для цилиндрического стержня литейной формы чугуна; *б* – для стержня сквозного паза

Модельные плиты формируют разъем литейной формы, на них закрепляют части модели. Используют для изготовления опочных и безопочных полуформ.

Для машинной формовки применяют координатные модельные плиты и плиты со сменными вкладышами (металлическая рамка плюс металлические или деревянные вкладыши).

5.3.4. Изготовление литейных форм

Основными операциями изготовления литейных форм являются: уплотнение формовочной смеси для получения точного отпечатка модели в форме и придание форме достаточной прочности; устройство вентиляционных каналов для вывода газов из полости формы; извлечение модели из формы; отделка и сборка формы.

Формы изготавливаются вручную, на формовочных машинах и на автоматических линиях.

Ручная формовка применяется для получения одной или нескольких отливок в условиях опытного производства, в ремонтном производстве, для отливок массой от нескольких килограммов до 300 т.

Приемы ручной формовки: в парных опоках по разъемной модели; формовка шаблонами; формовка в кессонах.

Формовка шаблонами применяется в единичном производстве для получения отливок, имеющих конфигурацию тел вращения. *Шаблон* – профильная доска.

Формовкой в кессонах получают крупные отливки массой до 200 т. *Кессон* – железобетонная яма, расположенная ниже уровня пола цеха, водонепроницаемая для грунтовых вод.

Механизированный кессон имеет две подвижные и две неподвижные стенки из чугунных плит, дно из полых плит, которые можно продувать (для ускорения охлаждения отливок и кессона). Кессон имеет механизм для передвижения стенок и приспособлен для установки и закрепления верхней полуформы.

Машинная формовка используется в массовом и серийном производстве, а также для мелких серий и отдельных отливок.

По характеру уплотнения различают машины прессовые, встряхивающие и др.

Уплотнение прессованием может осуществляться по различным схемам, в зависимости от размеров, формы моделей, степени и равномерности уплотнения и других условий.

В машинах с верхним уплотнением (рис. 5.16, а) уплотняющее давление действует сверху. При подаче сжатого воздуха в нижнюю часть цилиндра 1 прессовый поршень 2 и стол 3 с прикрепленной к нему модельной плитой 4 с моделью поднимаются. Прессовая колодка 7, закрепленная на траверсе 8 входит в наполнительную рамку 6 и уплотняет формовочную смесь в опоке 5. После прессования стол с модельной оснасткой опускают в исходное положение.

У машин с нижним прессованием формовочная смесь уплотняется самой моделью и модельной плитой.

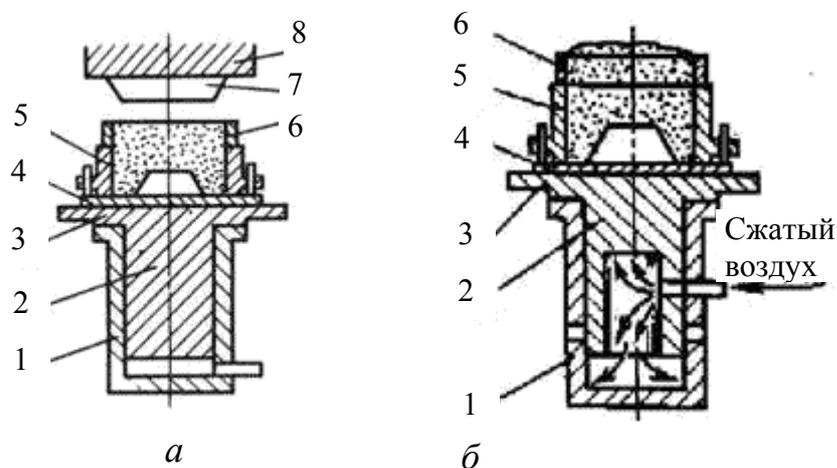


Рис. 5.16. Схемы способов уплотнения литейных форм при машинной формовке: а – прессованием; б – встряхиванием; 1 – нижняя часть цилиндра; 2 – прессовый (а) и встряхивающий (б) поршни; 3 – стол; 4 – модельная плита; 5 – опока; 6 – наполнительная рамка; 7 – прессовая колодка; 8 – траверса

Уплотнение встряхиванием происходит в результате многократно повторяющихся встряхиваний (рис. 5.16, б). Под действием сжатого воздуха, подаваемого в нижнюю часть цилиндра 1, встряхивающий поршень 2 и стол 3 с закрепленной на нем модельной плитой 4 с моделью поднимается на

30–100 мм до выпускного отверстия, затем падает. Формовочная смесь в опоке 5 и наполнительной рамке 6 уплотняется в результате появления инерционных сил. Способ характеризуется неравномерностью уплотнения. Уплотнение верхних слоев достигается допрессовкой.

Вакуумная формовка применяется для изготовления отливок из легкоплавких сплавов. Модельная плита, установленная в воздушной коробке, имеет вакуумную полость. В модели, прикрепленной к плите, имеются сквозные отверстия диаметром от 0,5 до 1 мм, совпадающие с отверстиями в плите. Модельную плиту с моделью закрывают нагретой полимерной пленкой и насосами создают вакуум от 40 до 50 кПа. Затем на модельную плиту устанавливается опока с сухим кварцевым песком, который уплотняется с помощью вибраций. На верхнюю поверхность опоки помещают разогретую пленку, плотно прилегающую к опоке. Полуформу снимают с модели. При заливке металла пленка сгорает, образуя противопригарное покрытие.

Пескомет – высокопроизводительная формовочная машина, применяется при изготовлении крупных отливок в опоках и кессонах. Уплотнение осуществляется рабочим органом пескомета – метательной головкой. Формовочная смесь подается в головку непрерывно. Пескомет обеспечивает засыпку смеси и ее уплотнение. При вращении ковша (1000–1500 об/мин) формовочная смесь выбрасывается в опоку со скоростью от 30 до 60 м/с. Метательная головка может перемещаться над опокой.

Безопочная автоматическая формовка используется при изготовлении форм для мелких отливок из чугуна и стали в серийном и массовом производстве.

Изготовление литейных форм осуществляется на высокопроизводительных пескодувно-прессовых автоматических линиях (рис. 5.17).

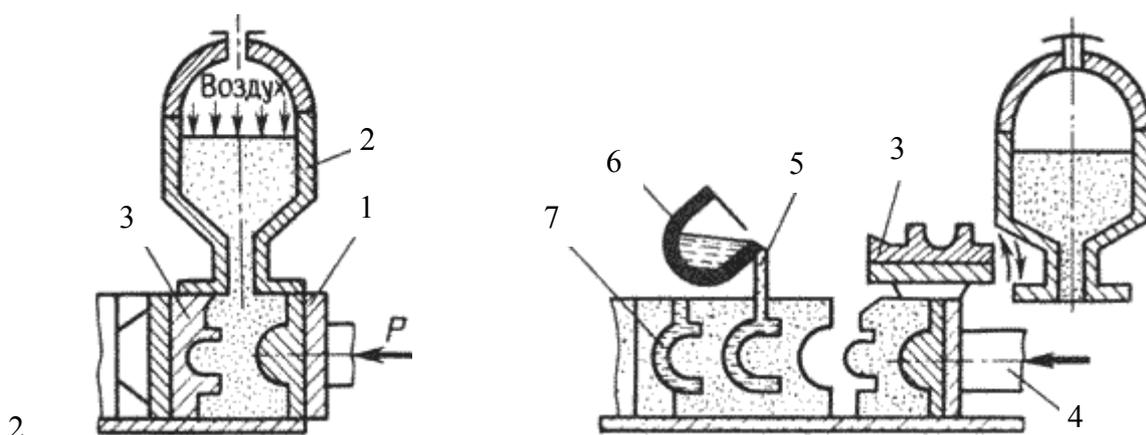


Рис. 5.17. Изготовление безопочных литейных форм: 1 – модельная плита; 2 – головка для подачи сжатого воздуха; 3 – модельная плита; 4 – плунжер; 5 – полость; 6 – ковш; 7 – отливка

Формовочная камера заполняется смесью с помощью сжатого воздуха из головки 2. Уплотнение осуществляется при перемещении модельной плиты 1 плунжером 4. После уплотнения поворотная модельная плита 3 отходит влево и поворачивается в горизонтальное положение. Полуформа перемещается плунжером 4 до соприкосновения с предыдущим комом, образуя полость 5. Затем производят заливку металла из ковша 6. После затвердевания и охлаждения отливок, формы подаются на выбивную решетку, где отливки 7 освобождаются от формовочной смеси.

Изготовление стержней осуществляется вручную или на специальных стержневых машинах из стержневых смесей и включает следующие операции: формовка сырого стержня, сушка, окраска сухого стержня. Если стержень состоит из нескольких частей, то после сушки их склеивают.

Ручная формовка осуществляется в стержневых ящиках. В готовых стержнях выполняют вентиляционные каналы. Для придания стержням необходимой прочности используются арматурные каркасы из стальной проволоки или литого чугуна.

Готовые стержни подвергаются сушке при температуре от 200 до 230 °С для увеличения газопроницаемости и прочности. Во время сушки из стержня удаляется влага, частично или полностью выгорают органические примеси.

Часто стержни изготавливают на пескодувных машинах. При использовании смесей с синтетическими смолами стержни изготавливают в нагреваемой оснастке.

Изготовление стержней из жидкостекольных смесей состоит в химическом отверждении жидкого стекла путем продувки стержня углекислым газом.

Приготовление расплава связано с плавлением различных материалов. Для получения заданного химического состава и определенных свойств в сплав в жидком или твердом состоянии вводят специальные легирующие элементы: хром, никель, марганец, титан и др.

Для плавления чугуна и стали в качестве исходных материалов применяют литейные или передельные доменные чугуны, чугуны и стальной лом, отходы собственного производства, а также флюсы (известняк) для понижения температуры плавления и образования шлаков.

Чугуны в основном выплавляют в вагранках. В последнее время развивается плавка в электрических печах, а также дуплекс-процесс, в особенности вариант «вагранка – индукционная печь».

Плавку стали ведут в электродуговых, индукционных и плазменно-индукционных печах.

Для плавления цветных металлов используют как первичные, полученные на металлургических заводах, так и вторичные, после переплавки цветного лома, металлы и сплавы, а также флюсы (хлористые и фтористые соли).

Для плавления применяют индукционные печи промышленной частоты, электрические печи сопротивления. Плавку тугоплавких металлов и сплавов ведут в вакууме или в среде защитных газов.

Сборка и заливка литейной формы. Сборка литейной формы включает: установку нижней полуформы; установку стержней, устойчивое положение которых обеспечивается стержневыми знаками; контроль отклонения размеров основных полостей формы; установку верхней полуформы по центрирующим штырям.

Заливка форм расплавленным металлом осуществляется из ковшей чайникового, барабанного и других типов. Важное значение имеет температура расплавленного металла. Целесообразно назначать ее от 100 до 150 °С выше температуры плавления: низкая температура увеличивает опасность незаполнения формы, захвата воздуха, ухудшения питания отливок; при высокой температуре металл больше насыщен газами, сильнее окисляется, возможен пригар на поверхности отливки.

Заливку ведут непрерывно до полного заполнения литниковой чаши.

Охлаждение, выбивка и очистка отливок. Охлаждение отливок до температуры выбивки длится от нескольких минут (для небольших тонкостенных отливок) до нескольких суток и недель (для крупных толстостенных отливок). Для сокращения продолжительности охлаждения используют методы принудительного охлаждения: обдувку воздухом или охлаждение змеевиками (укладывают при формовке), по которым пропускают воздух или воду.

Выбивка отливки – процесс удаления затвердевшей и охлажденной отливки из литейной формы, при этом литейная форма разрушается. Процесс осуществляют на специальных выбивных установках. Форма удаляется из опоки выталкивателем на виброжелоб, по которому направляется на выбивную решетку, где отливки освобождаются от формовочной смеси. Выбивку стержней осуществляют вибрационно-пневматическими и гидравлическими устройствами.

Обрубка отливок – процесс удаления с отливки прибылей, литников, выпоров и заливок по месту сопряжения полуформ. Процесс осуществляется пневматическими зубилами, ленточными и дисковыми пилами, при помощи газовой резки и на прессах.

После обрубки отливки зачищают, удаляя мелкие заливки, остатки выпоров и литников. Выполняют зачистку маятниковыми и стационарными шлифовальными кругами, пневматическими зубилами.

Очистка отливок – процесс удаления пригара, остатков формовочной и стержневой смесей с наружных и внутренних поверхностей отливок. Очистку осуществляют в галтовочных барабанах периодического или непрерывного действия (для мелких отливок), в гидropескоструйных и дробе-метных камерах, а также химической или электрохимической обработкой.

5.3.5. Специальные виды литья

Точность геометрических размеров, шероховатость поверхности отливок, полученных в песчаных формах, не всегда соответствуют требованиям современной техники. Применение специальных видов литья позволяет получать отливки высокой точности, с малой шероховатостью поверхности, с минимальными припусками на механическую обработку или полностью исключая ее.

5.3.5.1. Литье по выплавляемым моделям

Литье по выплавляемым моделям – процесс получения отливок из расплавленного металла в формах, не требующих разъема, так как рабочая полость образуется благодаря удалению (вытеканию) легкоплавкого материала модели при ее предварительном нагревании.

Для изготовления моделей широко используют модельный состав, содержащий парафин, стеарин, церезин, воск и др. Парафино-стеариновый состав широко применяют в качестве модельного. Он хорошо заполняет полость пресс-формы и дает четкий и чистый отпечаток.

Модельный состав в пастообразном состоянии запрессовывают (рис. 5.18, б) в пресс-формы. После затвердевания модельного состава пресс-форма раскрывается и модель выталкивается в ванну с холодной водой. Затем модели собирают в блоки (рис. 5.18, в) с общей литниковой системой припаиванием, приклеиванием или механическим скреплением частей. В один блок объединяют 2–100 моделей. Формы по выплавляемым моделям изготавливают погружением разовой модели в специальную жидкую огнеупорную суспензию, состоящую из связующего, пылевидного кварца и других компонентов, а затем обсыпают кварцевым песком в специальной установке. Далее сушат на воздухе или в среде аммиака (рис. 5.18, г), наносят 3–5 слоев с сушкой каждого слоя.

Модели из форм удаляют, погружая в горячую воду или с помощью нагретого пара. После удаления модельного состава тонкостенные литейные формы промывают, сушат, помещают в опоки и засыпают песком (рис. 5.18, д). Затем прокаливают в печи в течение 6–8 ч при температуре 850–950 °С для спекания частичек связующего с частичками огнеупорного материала и испарения воды.

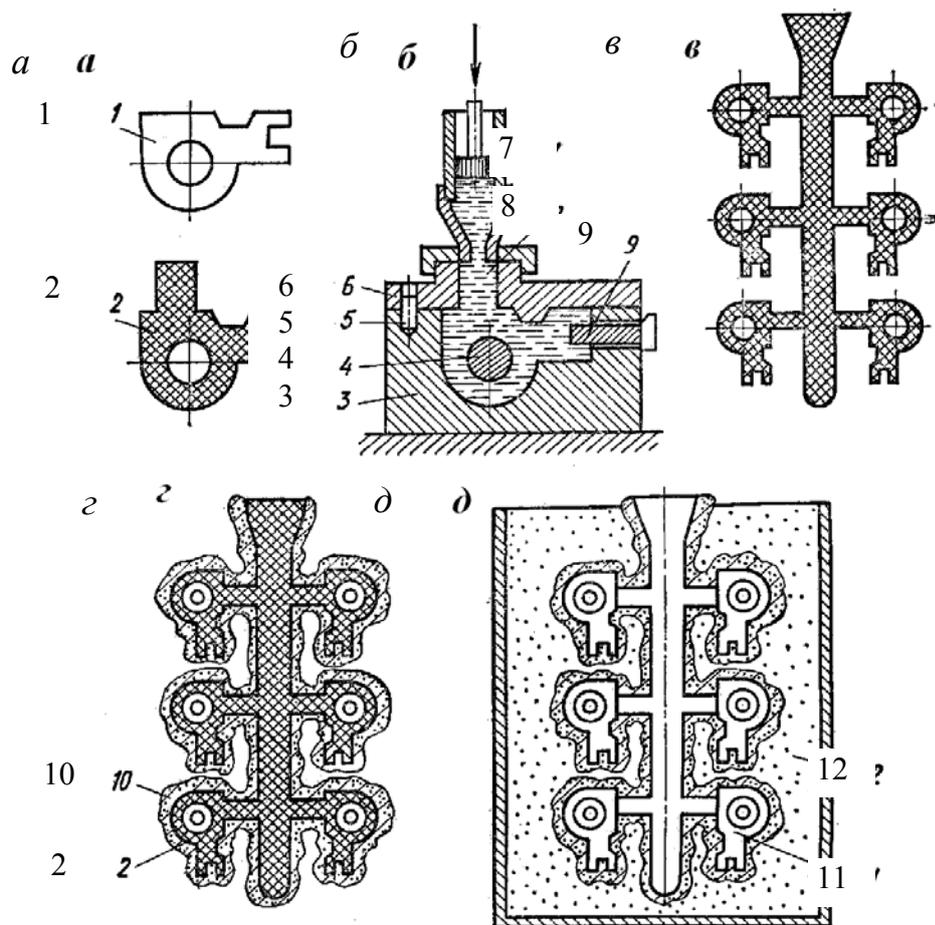


Рис. 5.18. Схема литья по выплавляемым моделям: а – конфигурация детали и модели; 1 – деталь; 2 – модель; б – изготовление модели в пресс-форме; в – сборка моделей в блок; г – образование оболочки на моделях; д – подготовка формы к заливке; 3, б – нижняя, верхняя матрицы; 4, 9 – металлические стержни; 5 – направляющий штырь; 7 – поршень; 8 – модельная масса; 10 – оболочка; 11 – полость формы; 12 – накопитель

Заливку форм по выплавляемым моделям производят сразу же после прокалки в нагретом состоянии. После затвердевания залитого металла и его охлаждения, отливки удаляют из форм механическими, а затем химическими методами, обрубая и, как правило, подвергают термической обработке.

В промышленности нашли применение следующие разновидности способов получения точных отливок:

литье по выжигаемым моделям: модель не выплавляют из формы, а выжигают. Модель изготавливают из пенополистирола и заформовывают. Не извлекая модель, форму заливают жидким металлом. Модель при соприкосновении с жидким металлом испаряется, и металл занимает пространство, где была модель;

литье по растворяемым моделям: модель изготавливают из соли (NaNO_3 , KNO_3 и др.). После изготовления формы при помощи этой модели ее растворяют и таким способом удаляют из формы;

литье по замороженным моделям: модель изготавливают из водных растворов солей. Жидкий раствор заливают в штамп и замораживают. По

замороженной модели изготавливают форму. Модель из формы удаляют нагреванием.

5.3.5.2. Литье в оболочковые формы

Оболочковые формы изготавливают из формовочной смеси, которая состоит из кварцевого песка и термореактивной смолы (6–7 %) в виде порошка. Связующие материалы обладают способностью оплавляться при нагревании до 100 °С. Когда температура нагрева переходит за 160 °С, смола необратимо затвердевает.

На [рис. 5.19](#) показана схема процесса получения оболочковой формы. На бункере 2 (I) с формовочной смесью закрепляют нагретую до 200–250 °С металлическую модельную плиту 1. После этого бункер с плитой опрокидывают на 180°, формовочная смесь 3 покрывает горячую модельную плиту (II) и начинает образовываться корочка из песка и смолы, перешедшей в жидкое состояние в пограничном с модельной плитой слое. Далее производится обратный поворот бункера на 180 °С (III) для удаления с него модельной плиты, на которой уже успела образоваться оболочковая полуформа 4. Оболочку помещают в электрическую печь и нагревают до 300–350 °С в течение одной минуты, термореактивная смола переходит в твердое необратимое состояние. С плиты удаляют готовую оболочковую полуформу 5 (IV). Две половинки оболочек соединяют скобами или склеивают. Полученную оболочковую форму заливают в вертикальном или горизонтальном положении через литниковую систему. Оболочковая форма из песчано-смоляной смеси после заливки металла легко разрушается, освобождая отливки.

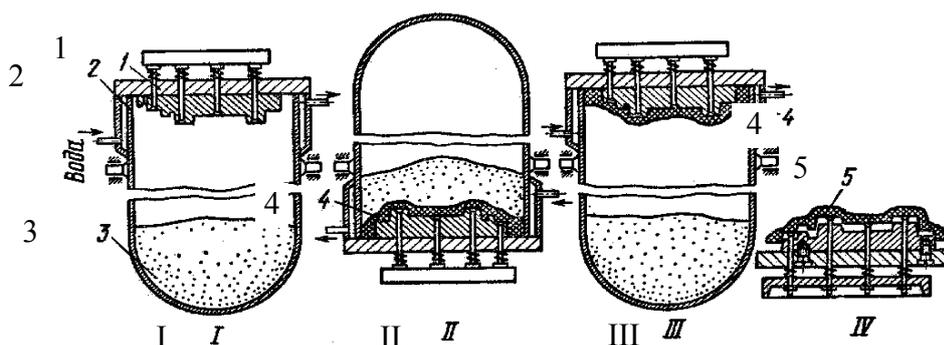


Рис. 5.19. Последовательность изготовления оболочковых форм

Для крупных отливок, ввиду опасности прорыва металла во время заливки, оболочковые формы помещают в опоку и засыпают чугунной дробью.

5.3.5.3. Литье в кокиль

Изготовление отливок в металлических формах осуществляется различными способами. Наибольшее распространение получили литье в кокиль, под давлением, выжиманием и центробежное.

Литье в кокиль – процесс получения фасонных отливок в формах, изготавливаемых из чугуна, стали или других сплавов. Метод литья в кокиль имеет ряд преимуществ перед литьем в песчаные формы: металлическая форма выдерживает большое количество заливок (от нескольких сотен до десятков тысяч) в зависимости от сплава, заливаемого в форму.

Отливки, полученные в кокиле, имеют бóльшую точность размеров и лучшую чистоту поверхности, чем при литье в песчаные формы, и требуют меньшего припуска на механическую обработку. Структура металла получается более мелкозернистой, вследствие чего повышаются его механические свойства; кроме того, устраняется необходимость в формовочной смеси, улучшаются технико-экономические показатели производства и санитарно-гигиенические условия труда.

Литье в кокиль имеет и недостатки. К ним относятся: большая стоимость изготовления формы; повышенная теплопроводность формы, что может привести к пониженной заполняемости форм металлом вследствие быстрой потери жидкотекучести; частое получение повышенного отбела у чугунных отливок, что затрудняет их механическую обработку.

Фасонные отливки при литье в кокиль изготавливают из стали, чугуна, медных, алюминиевых, магниевых и других сплавов.

Конструкции кокилей чрезвычайно разнообразны. Кокиль для простых отливок изготавливают из двух частей, соответствующих верхней и нижней опокам при литье в песчаные формы. Для сложных отливок форму изготавливают из нескольких разъемных частей, каждая из которых образует часть отливки. Поверхность разъема форм определяется конструкцией отливки.

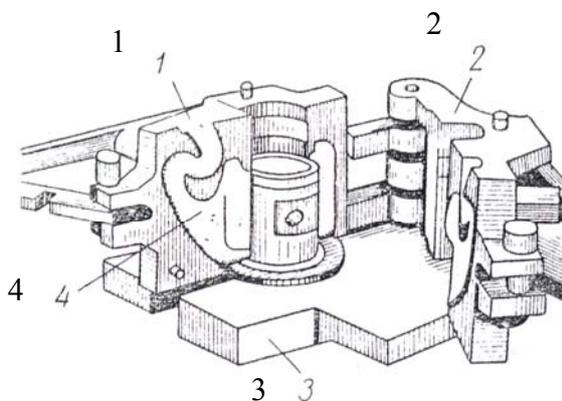


Рис. 5.20. Форма для изготовления алюминиевого поршня

Для получения внутренней полости отливки применяют песчаные и металлические стержни. Для отливок из легкоплавких сплавов преиму-

щественно применяют металлические стержни, а для чугунных и стальных отливок – песчаные.

Алюминиевые поршни отливают с металлическим стержнем. Корпус кокиля состоит из трех частей – 1–3 на [рис. 5.20](#). Литниковая система 4 расположена в плоскости разъема. Внутреннюю полость отливки образует металлический стержень. Для обеспечения возможности выемки металлического стержня из отливки его делают разъемным (из нескольких частей). После заливки и затвердевания сплава сначала вынимают центровую конусообразную часть 1, а затем боковые части 2 и 3.

5.3.5.4. Литье под давлением

Литье под давлением – способ получения фасонных отливок в металлических формах, которые принудительно заполняют металлом под давлением. Этот способ применяют в массовом производстве для тонкостенных отливок из сплавов цветных металлов. При данном способе обеспечивается большая точность размеров отливок, и они в подавляющем большинстве случаев не требуют дальнейшей механической обработки.

При литье под давлением металлические формы имеют более сложную конфигурацию, их изготавливают более точно и тщательно, чем при кокильном литье. Формы при литье под давлением делают стальными со стальными же стержнями. Применение песчаных стержней в данном случае исключено, так как струя металла под давлением может разрушить песчаный стержень. Для создания давления при заполнении формы металлом применяют специальные весьма сложные машины.

Существуют четыре основных типа машин для литья под давлением: поршневого действия с горячей камерой сжатия и с холодной камерой сжатия, компрессорного действия с неподвижной и подвижной камерой сжатия.

Машины поршневого действия с горячей камерой сжатия ([рис. 5.21, а](#)) применяют для сплавов, имеющих температуру плавления до 450 °С (оловянных, цинковых, свинцовых). Эти машины подразделяют по конструкции на ручные, полуавтоматы и автоматы, но принцип их действия один и тот же.

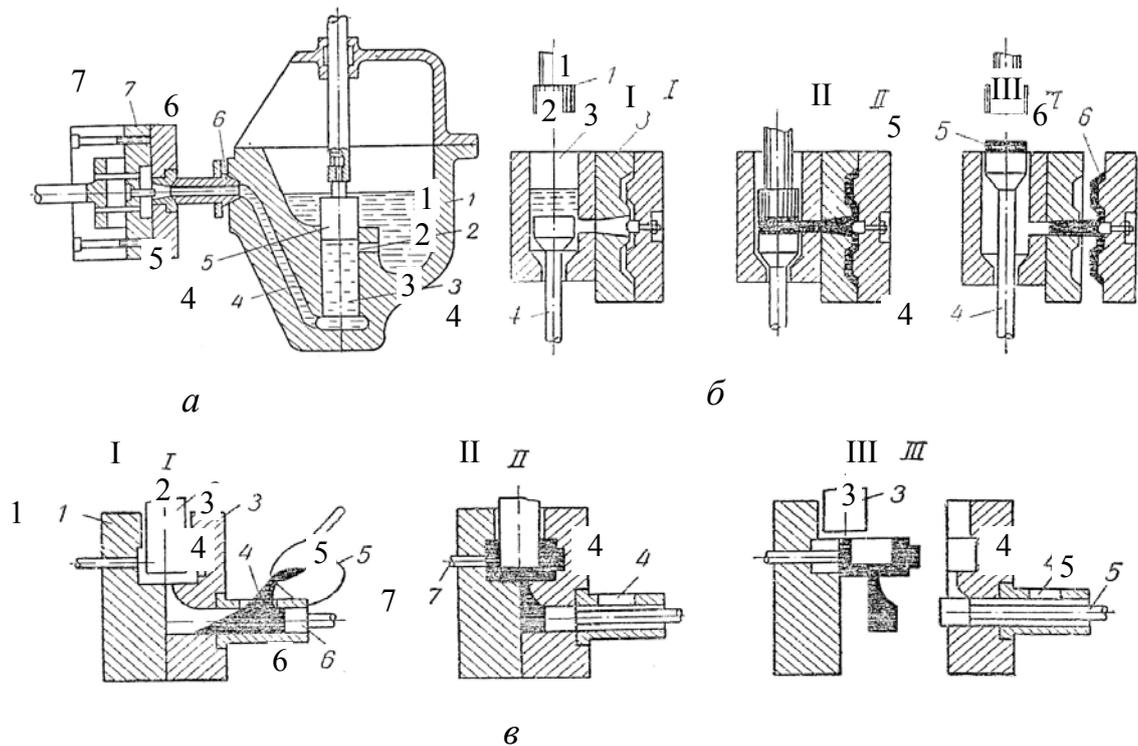


Рис. 5.21. Машины для литья под давлением поршневого действия: *а* – с горячей камерой сжатия; *б* – с холодной камерой сжатия; *в* – с горизонтальной камерой сжатия

В чугунную ванну *1* (рис. 5.21, *а*) заливают жидкий металл, для поддержания постоянной температуры металла ванну подогревают. Жидкий металл через отверстия *2* заполняет полость цилиндра *3* и подводящий канал *4*. Перед заливкой металла форму *7* закрывают, и конец мунштука *б* прижимается к ее ходовому каналу. В следующий момент автоматически включается пневматический цилиндр, поршень *5* скользит по цилиндру и вытесняет расплавленный металл в форму *7*.

После затвердевания залитого металла поршень поднимается и форма раскрывается, освобождая отливку. Затем форму обдувают, и рабочий цикл машины повторяется вновь.

Машины поршневого действия с холодной камерой сжатия широко используются для литья из тугоплавких цветных сплавов. Принцип устройства таких машин показан на рис. 5.21, *б*. Металл заливают дозировочным ковшом в цилиндр *2* (I). Нижний поршень *4* при этом перекрывает входное отверстие формы во избежание преждевременного попадания в нее металла. Затем прессующий поршень *1* совершает свой рабочий ход вниз (II). Нижний поршень *4* при этом опускается, опираясь заплечиками на соответствующие выступы камеры, а металл запрессовывается в форму *3*. В следующий момент поршень *1* отходит в верхнее положение (III). Остаток затвердевшего металла *5* ходом нижнего поршня *4* отрезается от литника и удаляется из цилиндра. Форму открывают и отливки *б* удаляют.

Наиболее широко применяют машины такого типа с горизонтальной камерой сжатия (рис. 5.21, в). Металл заливают через отверстие 4 ковшем 5 (I), поршнем 6 под давлением сплав заполняет пресс-форму, состоящую из подвижной 1 и неподвижной 3 (II) частей. В центре пресс-формы расположен стержень 2. После затвердевания сплава в пресс-форме отливку извлекают выталкивателем 7 (III).

5.3.5.5. Центробежное литье

Центробежное литье – способ получения отливок, при котором залитый в форму металл подвергается действию центробежных сил. Развитие центробежных сил в металле достигается заливкой металла во вращающуюся форму или приведением формы во вращение непосредственно после заполнения ее металлом.

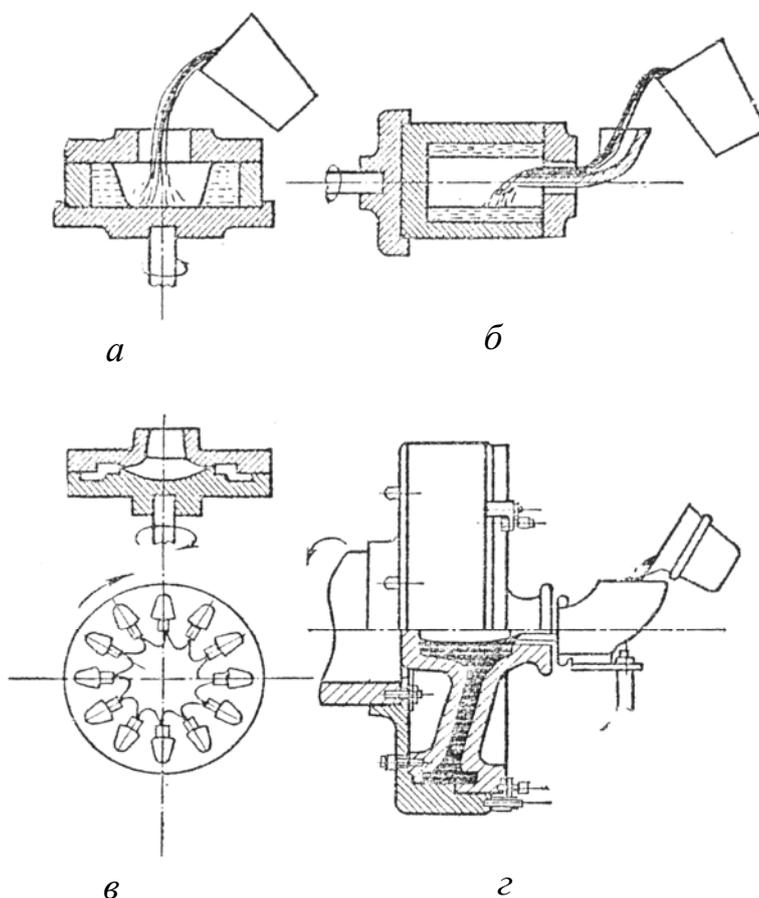


Рис. 5.22. Формы для центробежного литья

Форма приводится во вращение на специальных машинах для центробежного литья, которые изготавливают с различной осью вращения: вертикальной, горизонтальной и наклонной.

На рис. 5.22, а изображена схема получения отливки в форме, вращающейся вокруг вертикальной оси. Залитый металл отбрасывается центробежной силой к периферийной части формы и в таком положении

затвердевает. При этом внутренняя поверхность отливки получается без стержня. После затвердевания металла вращение формы прекращается и готовую заготовку извлекают из формы.

При вертикальной оси вращения формы свободная поверхность отливки получается параболической, разностенность отливки по высоте оказывается тем больше, чем меньше скорость вращения отливки. На этих машинах отливают детали, имеющие небольшую высоту (короткие втулки, кольца, венцы червячных зубчатых колес и т. д.).

На [рис. 5.22, б](#) представлена схема получения отливки при вращении вокруг горизонтальной оси. В результате отливки получают со стенками равномерной толщины как по длине, так и в поперечном сечении. Поэтому на указанных машинах отливают короткие и длинные изделия (втулки, трубы и т. д.).

На [рис. 5.22, в](#) показан процесс заливки фасонных деталей в металлические формы на машинах с вертикальной осью вращения. Металл заливают через общий стояк, отливки расположены вне оси вращения формы. Этим способом отливают изделия любой конфигурации, небольших габаритов (детали насосов, компрессоров, пароводопроводную арматуру и т. д.), причем полые отливки образуют песчаными стержнями.

На [рис. 5.22, г](#) приведена схема центробежной машины с горизонтальной осью вращения для отливки фасонных деталей. Формы при получении отливок по любой из схем могут быть металлическими и с песчаными футеровками (сырыми, сухими или сборными из стержней).

5.3.5.6. Литье выжиманием

Схема установки для литья выжиманием представлена на [рис. 5.23](#). В металлоприемник 1 заливают расплавленный металл. Подвижная матрица 2 перемещается в сторону неподвижной матрицы 3 с постоянной угловой скоростью.

При сближении матриц металл выжимается из металлоприемника и заполняет полость формы 4 между матрицами. Этим способом можно получать отливки с песчаными стержнями и крупногабаритные тонкостенные отливки.

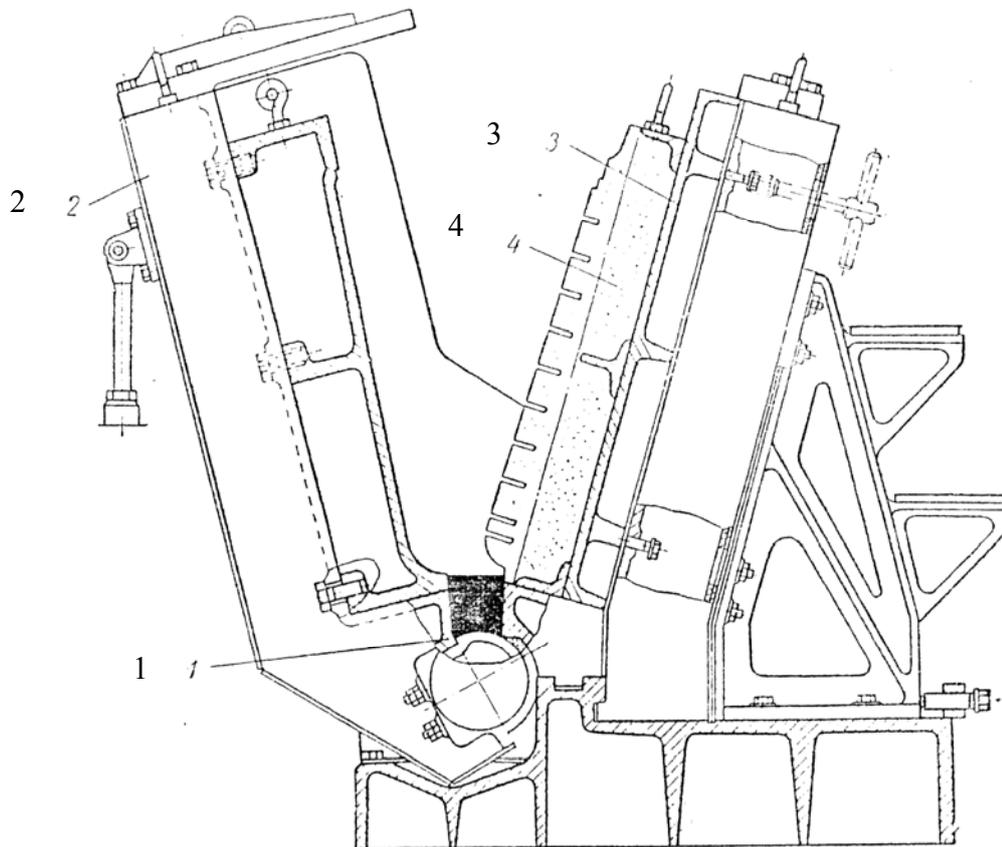


Рис. 5.23. Схема установки для литья выжиманием: 1 – металлоприемник; 2 – подвижная матрица; 3 – неподвижная матрица; 4 – форма

5.4. Особенности изготовления отливок из различных сплавов

Отливки из серого чугуна в основном изготавливают в песчаных формах, без применения прибылей.

При изготовлении отливок из серого чугуна в кокилях, в связи с повышенной скоростью охлаждения при затвердевании, начинает выделяться цементит – появление отбеливания. Для предупреждения отбела на рабочую поверхность кокиля наносят малотеплопроводные покрытия. Кокили перед работой нагревают, а чугун подвергают модифицированию. Для устранения отбела отливки подвергают отжигу.

Отливки типа тел вращения (трубы, гильзы, втулки) получают центробежным литьем.

Отливки из высокопрочного чугуна преимущественно изготавливают в песчаных формах, в оболочковых формах, литьем в кокиль, центробежным литьем. Достаточно высокая усадка чугуна вызывает необходимость создания условий направленного затвердевания отливок для предупреждения образования усадочных дефектов в массивных частях отливки путем установки прибылей и использования холодильников.

Расплавленный чугун в полость формы подводят через сужающуюся литниковую систему и, как правило, через прибыль.

Особенностью получения отливок из ковкого чугуна является то, что исходный материал – белый чугун – имеет пониженную жидкотекучесть и это требует повышенной температуры заливки при изготовлении тонкостенных отливок. Для сокращения продолжительности отжига чугун модифицируют алюминием, бором, висмутом. Отливки изготавливают в песчаных формах, а также в оболочковых формах и кокилях.

Литейные стали имеют пониженную жидкотекучесть, высокую усадку (до 2,5 %), склонны к образованию трещин.

Стальные отливки изготавливают в песчаных и оболочковых формах, литьем по выплавляемым моделям, центробежным литьем.

Для предупреждения усадочных раковин и пористости в отливках на массивные части устанавливают прибыли, а в тепловых узлах используют наружные или внутренние холодильники. Для предупреждения трещин формы изготавливают из податливых формовочных смесей, в отливках предусматривают технологические ребра.

Подачу расплавленного металла для мелких и средних отливок выполняют по разъему или сверху, а для массивных – сифоном. В связи с низкой жидкотекучестью площадь сечения питателей в 1,5–2 раза больше, чем при литье чугуна.

Для получения высоких механических свойств стальные отливки подвергают отжигу, нормализации и другим видам термической обработки.

Сплавы системы алюминий – кремний (силумины) имеют высокую жидкотекучесть, малую усадку (0,8–1 %), не склонны к образованию горячих и холодных трещин, потому что по химическому составу близки к эвтектическим сплавам (интервал кристаллизации составляет 10–30 °С). Остальные алюминиевые сплавы имеют низкую жидкотекучесть, повышенную усадку, склонны к образованию трещин.

Отливки из алюминиевых сплавов изготавливают литьем в кокиль, под давлением и в песчаные формы. При литье в кокиль используют кокили с вертикальным разъемом. Для получения плотных отливок устанавливают массивные прибыли. Металл подводят через расширяющиеся литниковые системы с нижним подводом металла к тонким сечениям отливки. Все элементы литниковой системы размещают в плоскости разъема кокиля.

Медные сплавы склонны к образованию трещин. Отливки изготавливаются литьем в песчаные и оболочковые формы, литьем в кокиль, под давлением и центробежным литьем.

Для предупреждения образования усадочных раковин и пористости в массивных узлах отливок устанавливают прибыли. Для предупреждения появления трещин в отливках используют форму с высокой податливостью.

Для плавного поступления металла применяют расширяющиеся литниковые системы с верхним, нижним и боковым подводом. Для отделения оксидных пленок в литниковой системе устанавливают фильтры из стеклоткани.

Титановые сплавы имеют высокую химическую активность в расплавленном состоянии. Они активно взаимодействуют с кислородом, азотом, водородом и углеродом. Плавку этих сплавов ведут в вакууме или в среде защитных газов.

Основной способ производства титановых отливок – литье в графитовые формы, в оболочковые формы из нейтральных оксидов магния, циркония. При изготовлении сложных тонкостенных отливок применяют формы, полученные по выплавляемым моделям.

5.5. Технологичность конструкций литых форм

Конструкция литой детали должна обеспечивать высокий уровень механических и эксплуатационных характеристик при заданной массе, конфигурации, точности размеров и шероховатости поверхности.

При проектировании отливки должны учитываться литейные свойства сплавов, а также технологии изготовления модельного комплекта, литейной формы, стержней, очистка и обрубка отливок, их дальнейшая обработка. Необходимо стремиться к уменьшению массы и упрощению конфигурации.

5.5.1. Основы конструирования литых заготовок

Минимальную толщину необрабатываемых стенок отливки определяют по диаграмме (рис. 5.24) в зависимости от габаритного размера.

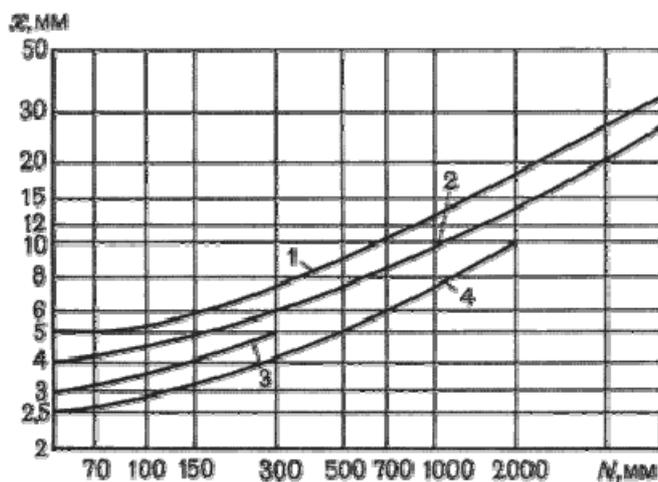


Рис. 5.24. Диаграммы для определения минимальной толщины стенок отливок из различных сплавов: 1 – сталь; 2 – серый чугун; 3 – бронза; 4 – алюминиевые сплавы

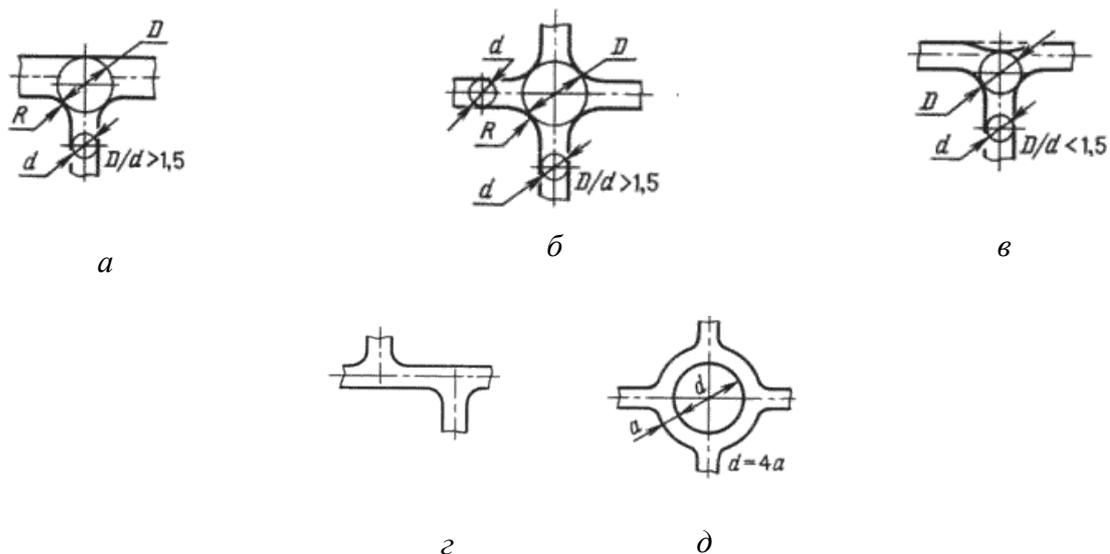


Рис. 5.25. Устранение местного скопления металла в стенках отливки: *а, б* – диаметр вписанных окружностей; *в* – уменьшение радиуса галтели; *г* – смещение одной стенки; *д* – проектирование отверстия

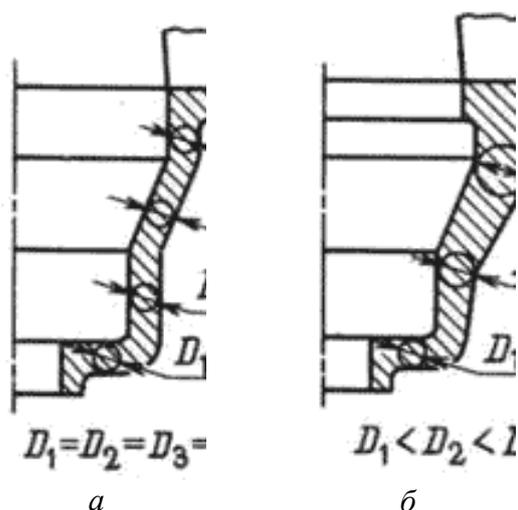


Рис. 5.26. Конструкции литых деталей, обеспечивающих одновременное (*а*) и направленное (*б*) затвердевание отливок

Толщина внутренних стенок и ребер принимается на 20 % меньше толщины наружных стенок.

Получение отливок без усадочных дефектов достигается при равномерной толщине стенок, т. е. если отсутствуют термические узлы – большое скопление металла в отдельных местах. Равномерность толщины стенки и скопление металла определяют диаметром вписанных окружностей (рис. 5.25, *а, б*). Желательно, чтобы соотношение диаметров вписанных окружностей в близко расположенных сечениях не превышало 1,5. Это достигается уменьшением радиуса галтели с помощью углублений в стенках отливки (рис. 5.25, *в*), смещением одной стенки (рис. 5.25, *г*), при возможности предусматривается отверстие (рис. 5.25, *д*).

Отливки, затвердевающие одновременно, должны иметь равномерную толщину стенок с плавными переходами (рис. 5.26, а). Принцип применяется для мелких и средних тонкостенных отливок из чугуна и других сплавов.

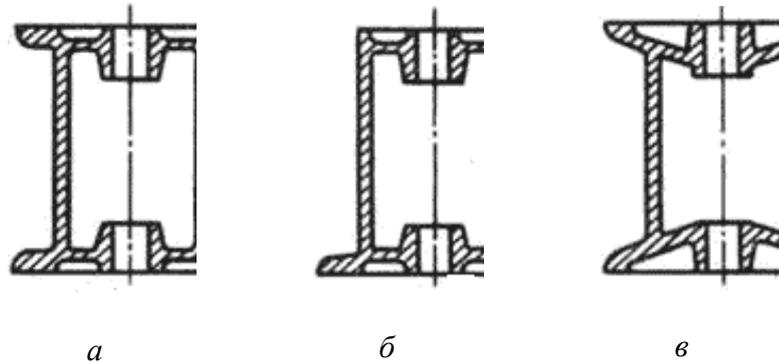


Рис. 5.27. Конструкции литых деталей, снижающие усадочные напряжения в отливках: а – корпусная деталь; б – конструкция, обеспечивающая свободную усадку; в – перегородки конической формы

При направленном затвердевании (рис. 5.26, б) верхние сечения отливок питаются от прибылей и служат прибылью для нижних сечений. Принцип направленного затвердевания применяется для деталей с повышенными требованиями к герметичности отливок.

Для снижения литейных напряжений необходимо обеспечить свободную усадку элементов отливки.

Корпусная деталь (рис. 5.27, а) имеет перегородки, которые затрудняют процесс усадки, в результате чего возникают значительные литейные напряжения. Конструкция, представленная на рис. 5.27, б, обеспечивает свободную усадку. Придание перегородкам конической формы (рис. 5.27, в) также снижает усадочные напряжения.

Коробление отливок, возникающее из-за недостаточной жесткости конструкции, можно устранить путем установки ребер жесткости. Кромки стенок большой протяженности усиливают буртиками.

5.5.2. Конфигурация отливок, получаемых литьем в песчаные формы

Внешние контуры отливок должны представлять собой сочетание простых геометрических тел с преобладанием плоских прямолинейных поверхностей с плавными переходами. При этом стремятся к уменьшению габаритных размеров и особенно высоты литой детали: это облегчает изготовление модельного комплекта, а также процессы формовки, сборки форм и очистки отливок. Отливка должна иметь один плоский разъем и располагаться по возможности в одной полуформе.

Контуры литых деталей должны обеспечивать формовку без дополнительных стержней. На рис. 5.28, а, в показаны конструкции деталей, при изготовлении отливок которых требуются соответственно три и два стержня.

При изменении конструкции детали (рис. 5.28, б, з) требуется только один стержень – процесс формовки упростился.

Необрабатываемые поверхности, перпендикулярные к плоскости разъема, должны иметь конструктивные уклоны.

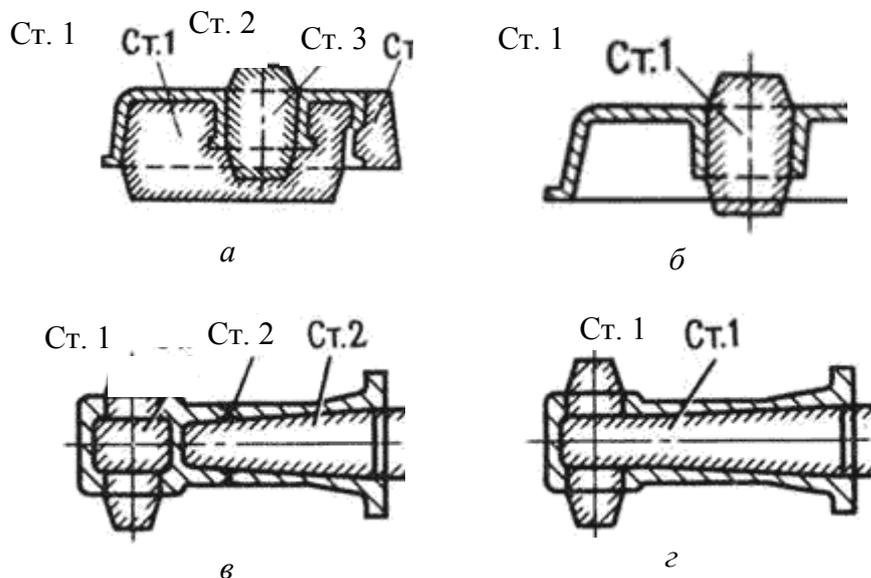


Рис. 5.28. Конструкции литых деталей: а, в – нетехнологичные; б, з – технологичные

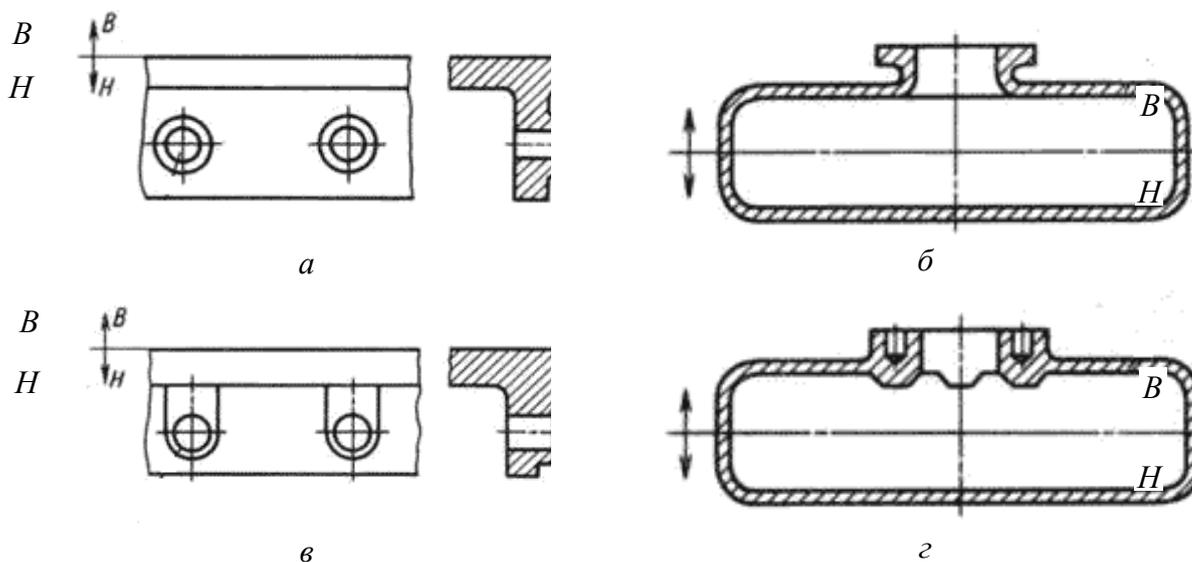


Рис. 5.29. Конструкции литой детали: а, б – нетехнологичные; в, з – технологичные

Бобышки, приливы и другие выступающие части необходимо конструировать так, чтобы не затруднять извлечение модели из формы (рис. 5.29). При изготовлении нетехнологичных отливок требуется применение в моделях отъемных частей или стержней, что усложняет процесс формовки.

В конструкции детали должно быть достаточное число окон для прочного крепления стержней в форме, удаления газов из стержня и удобства выбивки стержней из отливки.

В конструкции детали следует избегать пазов и узких полостей, при выполнении которых возможно образование песчаных раковин из-за разрушения стержней потоком расплавленного металла.

Минимальные диаметры отверстий в отливках выбираются в зависимости от материала и толщины стенки.

5.5.3. Выбор способа литья

При выборе способа литья для получения заготовки в первую очередь должен быть рассмотрен вопрос экономии металла. Металлоемкость можно снизить конструктивными и технологическими мероприятиями. Часто закладывается неоправданно большой запас прочности деталей, работающих при незначительных нагрузках. За счет изменения конструкции, образования выемок, изменения толщины стенок, применения коробчатых или тавровых сечений можно достичь значительной экономии металла.

При выборе способа получения отливки необходимо оценить все положительные и отрицательные стороны возможных технологических процессов, провести сравнительный анализ.

При сравнении различных способов литья необходимо учитывать различные факторы:

технологические свойства сплава – возможность для получения отливок без дефектов литейного происхождения и для обеспечения равномерной мелкозернистой структуры, высоких механических свойств. Литье в металлические формы нежелательно применять при пониженной жидкотекучести и высокой склонности к усадке (так как возможно образование трещин из-за низкой податливости формы);

технологичность конструкции детали. Сложные по конфигурации отливки получают литьем под давлением, по выплавляемым моделям, в песчаных формах. Литьем в кокиль получают отливки с простой наружной конфигурацией, центробежным литьем – отливки типа тел вращения. Наиболее тонкостенные отливки получают литьем по выплавляемым моделям и литьем под давлением. Специальные способы литья применяют для получения мелких и средних отливок, при литье в песчаные формы габариты и масса отливок не ограничены.

Следует выбирать способ, обеспечивающий заданную точность размеров и шероховатость поверхности. Высокое качество поверхности дает возможность сохранить при механической обработке литейную корку, имеющую повышенную твердость и износостойкость, снизить себестоимость готовых деталей за счет экономии металла.

Специальные способы литья целесообразно применять в крупносерийном и массовом производствах. Необходимо учитывать возможности имеющегося оборудования, уровень литейной технологии и технологии механической обработки. Наиболее точным показателем, определяющим эффективность применения того или иного способа, является себестоимость отливки.

ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗАГОТОВОК В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Формоизменение давлением основано на способности заготовок из металлов и других материалов изменять свою форму без разрушения под действием внешних сил.

Обработка давлением обычно преследует две основные цели: получение изделий сложной формы и улучшение кристаллической структуры исходного литого металла с повышением его механических свойств.

Наряду с экономным расходом металла и повышением его механических свойств в готовых изделиях обработка давлением обеспечивает высокую производительность труда, по сравнению с другими методами обработки, благодаря высоким скоростям обработки и одновременному деформированию всего объема заготовки или значительной его части.

Способность металлов пластически деформироваться называется *пластичностью*. При пластическом деформировании металла одновременно с изменением формы меняется ряд его свойств.

6.1. Виды обработки металлов давлением

Процессы обработки металлов давлением по назначению подразделяют на два вида. К первому виду относят прокатку, прессование, волочение, которыми получают заготовки постоянного сечения по длине – *машиностроительные профили* (прутки, проволока, трубы, ленты, листы и т. д.). Профили применяют в строительных конструкциях и в качестве заготовок для последующей обработки давлением или резанием.

Второй вид процессов обработки давлением, к которым относят ковку и штамповку, применяют для придания заготовкам (поковкам) формы, приближенной к форме готовой детали.

Прокатка (рис. 6.1, а) заключается в обжатии заготовки 2 между вращающимися валками 1. Силами трения $P_{тр}$ заготовка втягивается между валками, а силы P , нормальные к поверхности валков, уменьшают поперечные размеры заготовки.

Прессование (рис. 6.1, б) заключается в продавливании заготовки 2, находящейся в замкнутой форме 3, через отверстие матрицы 1. При этом форма и размеры поперечного сечения выдавленной части заготовки соответствуют форме и размерам отверстия матрицы, а длина ее пропорциональна отношению площадей поперечного сечения исходной заготовки и выдавленной части и перемещению давящего инструмента 4.

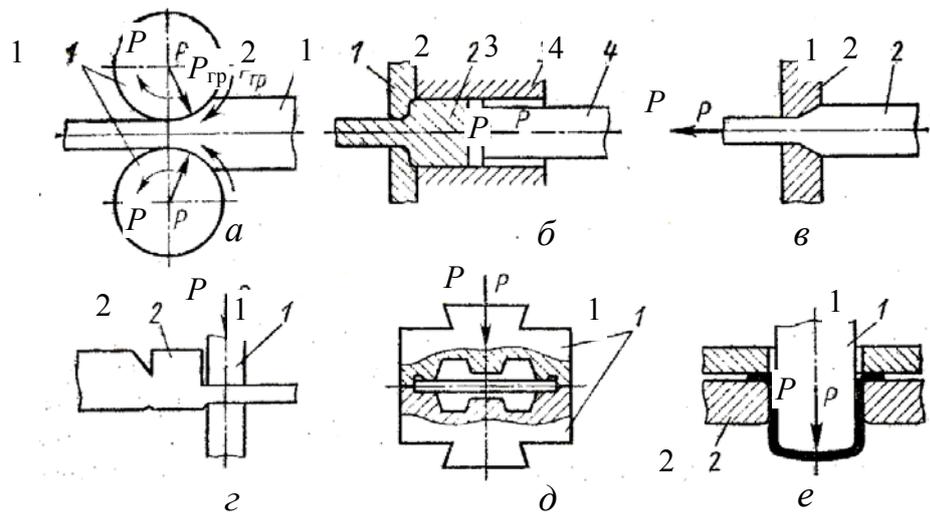


Рис. 6.1. Схемы основных видов обработки металлов давлением

Волочение (рис. 6.1, в) заключается в протягивании заготовки 2 через сужающуюся полость матрицы 1. Площадь поперечного сечения заготовки уменьшается и получает форму поперечного сечения отверстия матрицы.

Ковкой (рис. 6.1, г) изменяют форму и размеры заготовки 2 путем последовательного воздействия универсальным инструментом 1 на отдельные участки заготовки.

Штамповкой изменяют форму и размеры заготовки с помощью специализированного инструмента – штампа (для каждой детали изготовляют свой штамп). Различают объемную и листовую штамповку. При объемной штамповке (рис. 6.1, д) на заготовку, являющуюся обычно отрезком прутка, воздействуют специализированным инструментом – штампом 1, причем металл заполняет полость штампа, приобретая ее форму и размеры.

Листовой штамповкой (рис. 6.1, е) получают плоские и пространственные полые детали из заготовок, которыми являются лист, лента, полоса. Обычно заготовка деформируется с помощью пуансона 1 и матрицы 2.

6.2. Влияние обработки металлов давлением на структуру и свойства металлов

6.2.1. Механизм пластического деформирования

Пластическая деформация в кристалле осуществляется путем сдвига одной части относительно другой. Сдвиг вызывают касательные напряжения, когда их значение превышает критическое τ .

Имеется две разновидности сдвига: *скольжение* и *двойникование*. При скольжении одна часть кристалла смещается параллельно другой части вдоль плоскости, называемой *плоскостью скольжения* или *сдвига* (рис. 6.2, а).

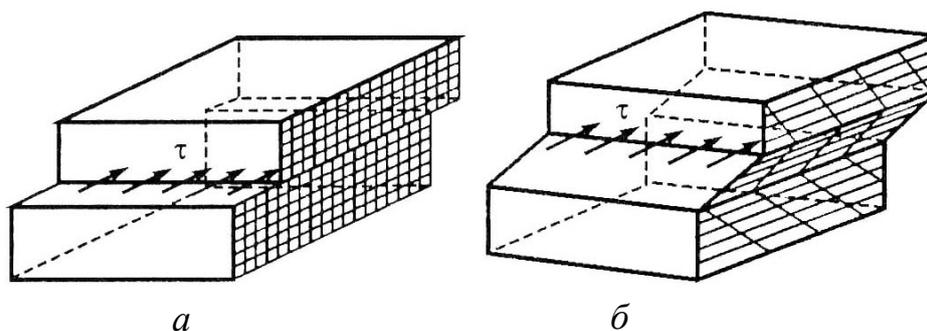


Рис. 6.2. Схемы пластической деформации: а – скольжения; б – двойникования

Двойникование представляет собой перестройку части кристалла в новое положение, зеркально симметричное к его недеформированной части (рис. 6.2, б). Плоскость зеркальной симметрии называют *плоскостью двойникования*. При двойниковании атомные плоскости кристалла сдвигаются параллельно плоскости двойникования на разные расстояния. Часть кристалла, в которой в результате двойникования произошла переориентация кристаллической решетки, называется *двойником деформации*.

По сравнению со скольжением двойникование имеет второстепенное значение. Роль двойникования возрастает, когда скольжение затруднено. В металлах с ОЦК- и ГЦК-решетками двойникование наблюдается лишь при низких температурах или высоких скоростях деформирования. При нормальных условиях в металлах с ГПУ-решеткой деформация развивается как двойникованием, так и скольжением. Механизм двойникования сложен и далее рассматриваться не будет.

Скольжение развивается по плоскостям и направлениям, на которых плотность атомов максимальна (рис. 2.4 и рис. 2.5). Плоскость скольжения вместе с направлением скольжения, принадлежащим этой плоскости, образует систему скольжения. Число систем скольжения неодинаково в металлах с разным типом решеток. У металлов с ГЦК-решеткой скольжение идет по плоскостям $\{111\}$ в направлениях $[110]$. В металлах с ОЦК-решеткой скольжение развивается по плоскостям $\{110\}$ в направлении $[111]$.

У металлов с ГПУ-решеткой скольжение развивается по плоскостям базиса. Эти металлы менее пластичны, чем металлы с ОЦК- и ГЦК-решетками. Число систем скольжения может возрасти, если уменьшатся критические напряжения сдвига в других плоскостях.

Элементарный акт сдвига – это смещение одной части кристалла относительно другой на одно межатомное расстояние. В идеальном кристалле в скольжении должны одновременно участвовать все атомы, находящиеся в плоскости сдвига. Для такого синхронного «жесткого» сдвига требуется критическое касательное напряжение, которое называют *теоретической прочностью кристалла*. В реальных кристаллах для сдвига на одно межатомное расстояние требуется напряжение в 1000 раз меньше теоретического значения. Низкая прочность реальных кристаллов обусловлена их структурным несовершенством.

Пластическое деформирование в реальных кристаллах осуществляется путем последовательного перемещения дислокаций. Дислокация легко движется в той плоскости, в которой находится дислокационная линия MM (рис. 6.3) и ее вектор Бюргера. Перемещение краевой дислокации при сдвиге на одно межатомное расстояние представляет собой согласованную перегруппировку атомов около дислокации и не сопровождается диффузионным переносом массы.

Как видно из схемы, приведенной на [рис. 6.3](#), для перемещения краевой дислокации справа налево из положения 1 в положение 2 требуется лишь незначительное перемещение атомов (обозначенных черными кружками).

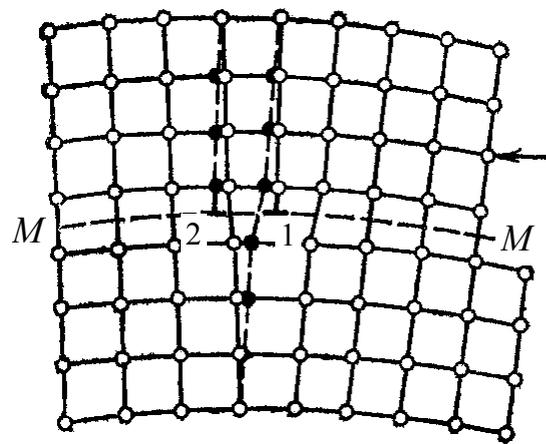


Рис. 6.3. Схема смещения атомов при перемещении краевой дислокации на один параметр решетки

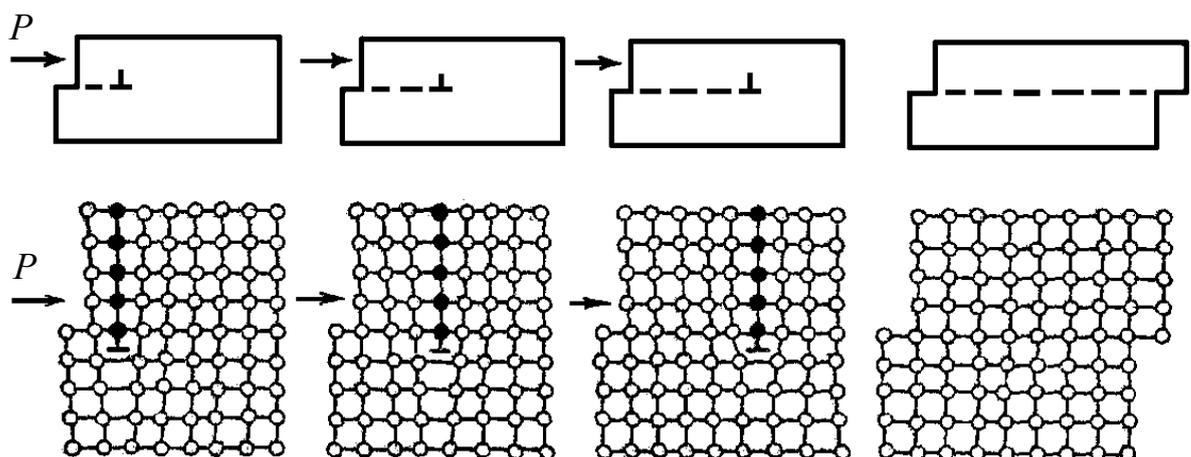


Рис. 6.4. Схема сдвига на один параметр решетки верхней части зерна относительно его нижней части при движении дислокации через всю плоскость скольжения

При дальнейшем движении дислокация пройдет всю плоскость и выйдет на поверхность зерна (блока). При этом верхняя часть зерна окажется сдвинутой по отношению к нижней его части на один межатомный период решетки ([рис. 6.4](#)). Так как в каждый момент смещается лишь небольшая

группа атомов в области дислокации и на незначительные расстояния (меньше межатомных), то пластическая деформация совершается при небольшой величине касательных напряжений, что подтверждается экспериментальными данными.

Рассмотренный дислокационный механизм схематически представляет физическую сущность пластической деформации, происходящей путем скольжения (сдвига) в единичной кристаллографической плоскости монокристалла (одного зерна).

В процессе скольжения возникают новые дислокации, их плотность повышается.

6.2.2. Особенности деформирования моно- и поликристаллов

В начале деформирования монокристалла под действием касательного напряжения τ он не упрочняется, а его деформация ϵ велика. Начальную стадию – стадию I деформирования называют стадией *легкого скольжения* (рис. 6.5). При этом дислокации перемещаются в монокристалле, практически не встречая препятствий.

С ростом деформации скольжение распространяется на другие системы и возникает *множественное скольжение*. На стадии II дислокации перемещаются в пересекающихся плоскостях, возрастает сопротивление их движению и образуется сложная дислокационная структура.

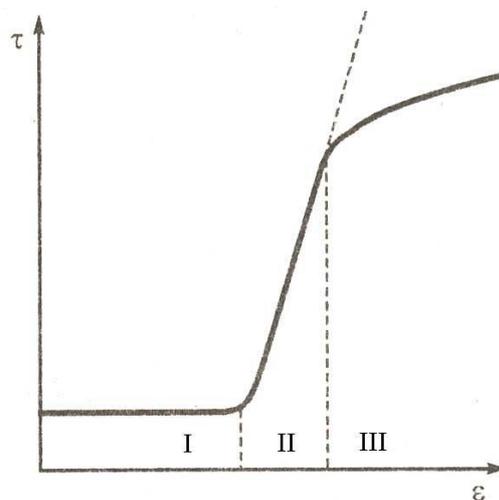


Рис. 6.5. Диаграмма деформирования монокристалла:
 I – стадия легкого скольжения; II – стадия множественного скольжения;
 III – стадия динамического разупрочнения

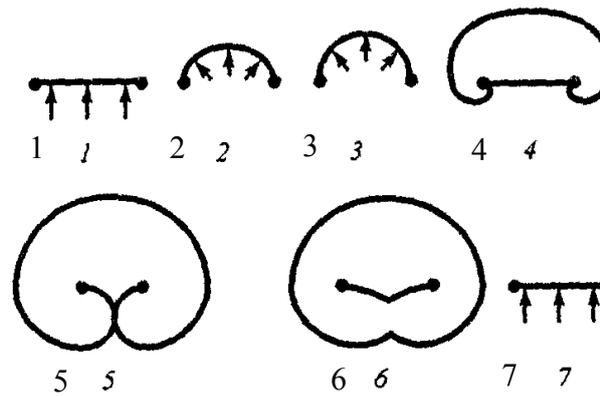


Рис. 6.6. Последовательность образования новой дислокации при действии источника Франка – Рида

Наконец, стадия III характеризуется более замедленным упрочнением по сравнению со стадией II. Винтовые дислокации переходят в смежные плоскости скольжения, и возникает поперечное скольжение, которое, по своей сути, является процессом разупрочнения. Разупрочнение на стадии III развивается по мере деформирования, и его называют *динамическим возвратом*.

Скольжение дислокаций не связано с диффузией, так как происходит без переноса массы. Этим объясняется сравнительная легкость их передвижения и при отрицательных температурах, когда скорость диффузии мала.

В основе упрочнения металла при деформировании лежит прежде всего повышение плотности дислокаций. В процессе скольжения возникают новые дислокации и их плотность повышается от 10^8 до 10^{12} см⁻² (более высокую плотность получить нельзя из-за появления трещин и разрушения металла). Существует несколько механизмов образования новых дислокаций, среди которых выделяют источник Франка – Рида (рис. 6.6): под действием касательного напряжения закрепленная дислокация (см. 1 на рис. 6.6) выгибается, пока не примет форму полуокружности (см. 2–3 на рис. 6.6). С этого момента изогнутая дислокация распространяется самопроизвольно в виде двух спиралей (4 на рис. 6.6). При встрече спиралей возникает расширяющаяся дислокационная петля и отрезок дислокации (5, 6 на рис. 6.6). Отрезок распрямляется, занимает исходное положение (7 на рис. 6.6), и генератор дислокаций готов к повторению цикла.

Один источник Франка – Рида способен образовывать сотни новых дислокаций.

Движению дислокаций мешают различные препятствия: границы зерен, дефекты упаковки, межфазные поверхности, а также дислокации, пересекающие плоскость скольжения. Через некоторые препятствия дислокации проходят при более высоких напряжениях. Такими препятствиями являются, например, пересекающиеся с плоскостью скольжения дислокации.

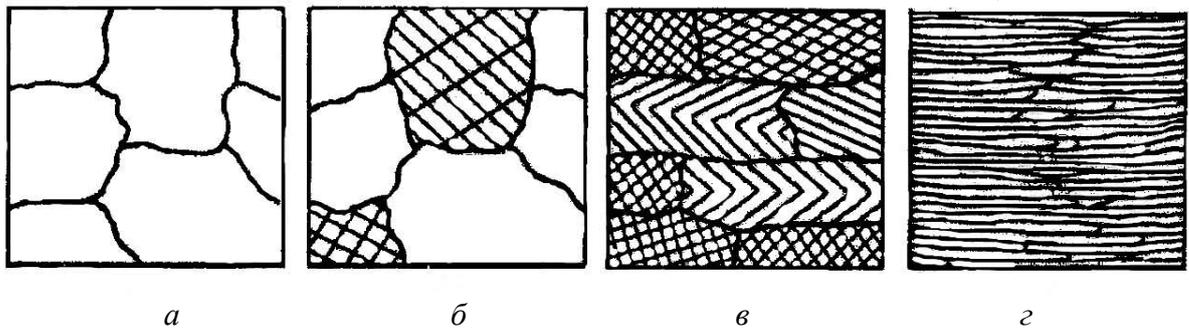


Рис. 6.7. Изменение микроструктуры поликристаллического металла при деформации: *a* – исходное состояние ($\varepsilon = 0\%$); *b* – $\varepsilon = 1\%$; *v* – $\varepsilon = 40\%$; *z* – $\varepsilon = 80\text{--}90\%$

Каждое скопление дислокаций создает поле напряжений, отталкивающее приближающуюся деформацию. Чем больше дислокаций в скоплении, тем сильнее отталкивание и тем труднее деформируется металл. Когда плотность дислокаций в скоплении достигает определенного значения, в этом месте зарождается трещина.

При нагреве выше $0,3T_{\text{пл}}$ начинает действовать другой механизм перемещения дислокаций – *переползание*, представляющее собой диффузионное смещение дислокации в соседние плоскости решетки в результате присоединения вакансий.

По мере присоединения вакансий дислокация на значительном участке своей длины смещается на десятки межатомных расстояний. Из-за переползания ослабляется тормозящий эффект частиц второй фазы. Переместившиеся дислокации далее сдвигаются путем скольжения под действием напряжения. При нагреве выше $0,3T_{\text{пл}}$ вакансии весьма подвижны, а необходимое число вакансий создается пластической деформацией.

В технических металлах, являющихся телами поликристаллическими (рис. 6.7, *a*), пластическая деформация происходит достаточно сложно. Деформация зерен начинается сразу по нескольким системам скольжения. Пока общая деформация мала, зерна деформируются неоднородно в силу их разной ориентации по отношению к приложенным нагрузкам (рис. 6.7, *b*).

С ростом степени деформации зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения (рис. 6.7, *v*). Внутри зерен повышается плотность дефектов. При значительных деформациях образуется волокнистая структура, где границы зерен различаются с трудом (рис. 6.7, *z*).

При значительной деформации в металле появляется кристаллографическая ориентация зерен, которая называется *текстурой деформации*. Это результат одновременного деформирования зерен по нескольким системам скольжения. Она зависит от вида деформирования кристаллической структуры металла, наличия примесей и условий деформирования.

6.2.3. Свойства холоднодеформированных металлов

При холодной деформации формоизменение сопровождается изменением механических и физико-химических свойств металла. Это явление называется *упрочнением (наклепом)*.

Наклепанный металл запасает 5–10 % энергии, затраченной на деформирование. Запасенная энергия тратится на образование дефектов решетки и на ее упругие искажения. Свойства наклепанного металла изменяются тем сильнее, чем больше степень деформации.

При холодном деформировании, когда температура металла ниже $0,3T_{пл}$, увеличиваются прочностные характеристики (твердость, σ_b , $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{упр}$) и понижаются пластичность и ударная вязкость (δ , Ψ , KCU). Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании деформации механические свойства изменяются незначительно. С увеличением степени деформации предел текучести растет быстрее временного сопротивления. Обе характеристики у сильно наклепанных металлов сравниваются, а удлинение становится равным нулю. Такое состояние наклепанного металла является предельным, при попытке продолжить деформирование металл разрушается. Путем наклепа твердость и временное сопротивление удается повысить в 1,5–3 раза, а предел текучести – в 3–7 раз. Металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее металлов с ОЦК-решеткой. Упрочнение возникает вследствие поворота плоскостей скольжения, увеличения искажений кристаллической решетки, накопления дислокаций у границ зерен.

Из-за неоднородности деформации в объеме металла различны изменения плотности, что служит причиной появления остаточных напряжений, как растягивающих, так и сжимающих.

С увеличением деформации повышается удельное электросопротивление (максимально на 6 %), а у ферромагнетиков, к которым относится большинство сталей, понижаются магнитная проницаемость и остаточная индукция, возрастает коэрцитивная сила.

Наклепанные металлы легче окисляются и склонны к коррозионному растрескиванию. Образование текстуры деформации вызывает анизотропию свойств.

Несмотря на снижение пластичности, наклеп широко используют для повышения прочности деталей, изготовленных методами холодной обработки давлением. Снижение пластичности при наклепе улучшает обрабатываемость резанием вязких и пластичных материалов (латуней, сплавов алюминия и др.).

Холодная деформация без нагрева заготовки позволяет получить большую точность размеров и лучшее качество поверхности по сравнению с обработкой давлением при достаточно высоких температурах. Отметим, что обработка давлением без специального нагрева заготовки позволяет сократить продолжительность технологического цикла, облегчает использование средств механизации и автоматизации и повышает производительность труда.

Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла

Изменения, внесенные холодной деформацией в структуру и свойства металла, не необратимы. Они могут быть устранены, например, с помощью термической обработки (отжигом). В этом случае происходит внутренняя перестройка, при которой за счет дополнительной тепловой энергии, увеличивающей подвижность атомов, в твердом металле без фазовых превращений из множества центров растут новые зерна, заменяющие собой вытянутые, деформированные зерна. В равномерном температурном поле скорость роста зерен по всем направлениям одинакова. Новые равноосные зерна, появившиеся взамен деформированных, имеют примерно одинаковые размеры по всем направлениям.

Явление зарождения и роста новых равноосных зерен взамен деформированных, вытянутых, происходящее при определенных температурах, называется *рекристаллизацией*. Для чистых металлов рекристаллизация начинается при абсолютной температуре $T_{рек}$, равной 0,4 абсолютной температуры плавления металла. Рекристаллизация протекает с определенной скоростью, причем время, требуемое для рекристаллизации, тем меньше, чем выше температура нагрева деформированной заготовки.

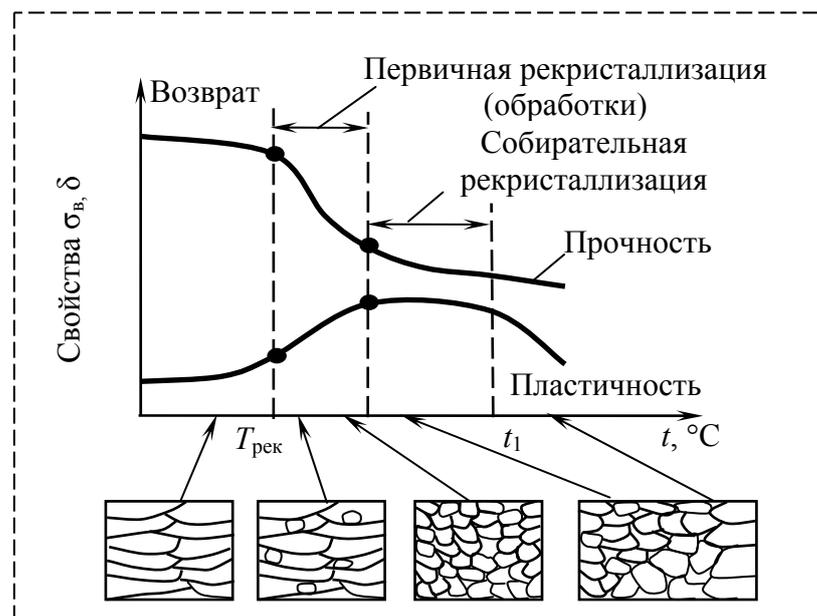


Рис. 6.8. Схема изменения структуры и свойств наклепанного металла при возврате и рекристаллизации

При температурах ниже температуры начала рекристаллизации наблюдается явление, называемое *возвратом*. При возврате (отдыхе) форма и размеры деформированных, вытянутых зерен не изменяются, но частично снимаются остаточные напряжения. Эти напряжения возникают из-за неоднородного нагрева или охлаждения (при литье и обработке давлением), неоднородности распределения деформаций при пластическом деформиро-

вании и т. д. Остаточные напряжения создают системы взаимно уравновешивающихся сил и наводятся в заготовке, не нагруженной внешними силами. Снятие остаточных напряжений при возврате почти не изменяет механических свойств металла, но влияет на некоторые его физико-химические свойства. Так, например, в результате возврата значительно повышается электрическая проводимость, сопротивление коррозии холоднодеформированного металла.

До температуры $T_{рек}$ сохраняется деформируемое зерно (рис. 6.8). При температуре выше $T_{рек}$ в деформируемом металле растут зародыши новых зерен с неискаженной решеткой. При нагреве наклепанного металла не восстанавливается старое зерно, а появляется совершенно новое зерно, размеры которого могут отличаться от исходных. Образование новых зерен и резкое снижение плотности дислокаций приводит к высвобождению основной доли энергии, накопленной в процессе холодной пластической деформации в объеме металла. Как видно из рис. 6.8, при рекристаллизации прочность, характеризующаяся временным сопротивлением σ_v , резко снижается, а пластичность δ возрастает. Это разупрочнение объясняется снятием искажения решетки и резким уменьшением плотности дислокаций.

Для полного снятия наклепа металл нагревают до более высоких температур, чем $T_{рек}$, чтобы обеспечить высокую скорость рекристаллизации и полноту ее протекания. Такая термическая обработка называется *рекристаллизационным отжигом*.

После завершения первичной рекристаллизации при продолжении нагрева происходит рост одних рекристаллизованных зерен за счет других. Этот процесс называется *собирающей рекристаллизацией* (рис. 6.8). Основной причиной собирающей рекристаллизации является стремление к уменьшению энергии благодаря уменьшению протяженности границ при росте зерна. При температуре t_1 (рис. 6.8) пластичность может уменьшаться, что объясняется сильным ростом зерна – *перегревом*.

Величина зерна после рекристаллизации оказывает большое влияние на свойства металла. Металлы и сплавы, имеющие мелкое зерно, обладают повышенной прочностью и вязкостью. Однако в некоторых случаях необходимо, чтобы металл имел крупное зерно. Так, трансформаторная сталь или техническое железо имеют наиболее высокие магнитные свойства при крупном зерне.

6.2.5. Горячая деформация

Формоизменение заготовки при температуре выше температуры рекристаллизации сопровождается одновременным протеканием упрочнения и рекристаллизации.

Горячей деформацией называют деформацию, характеризующуюся таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всем объеме заготовки и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной без следов упрочнения (рис. 6.9, б).

Чтобы обеспечить условия протекания горячей деформации, приходится с увеличением ее скорости повышать температуру нагрева заготовки (для увеличения скорости рекристаллизации).

Если металл по окончании деформации имеет структуру, не полностью рекристаллизованную, со следами упрочнения, то такая деформация называется неполной горячей деформацией. Неполная горячая деформация приводит к получению неоднородной структуры, снижению механических свойств и пластичности, поэтому обычно нежелательна.

При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной, а отсутствие упрочнения приводит к тому, что сопротивление деформированию (предел текучести) незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Поэтому горячую обработку применяют для изготовления крупных деталей, так как при этом требуются меньшие усилия деформирования (менее мощное оборудование).

При горячей деформации пластичность металла выше, чем при холодной. Поэтому горячую деформацию целесообразно применять при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла (слитков). В то же время при горячей деформации окисление заготовки более интенсивно (образуется слой окалины), что ухудшает качество поверхности и точность получаемых размеров.

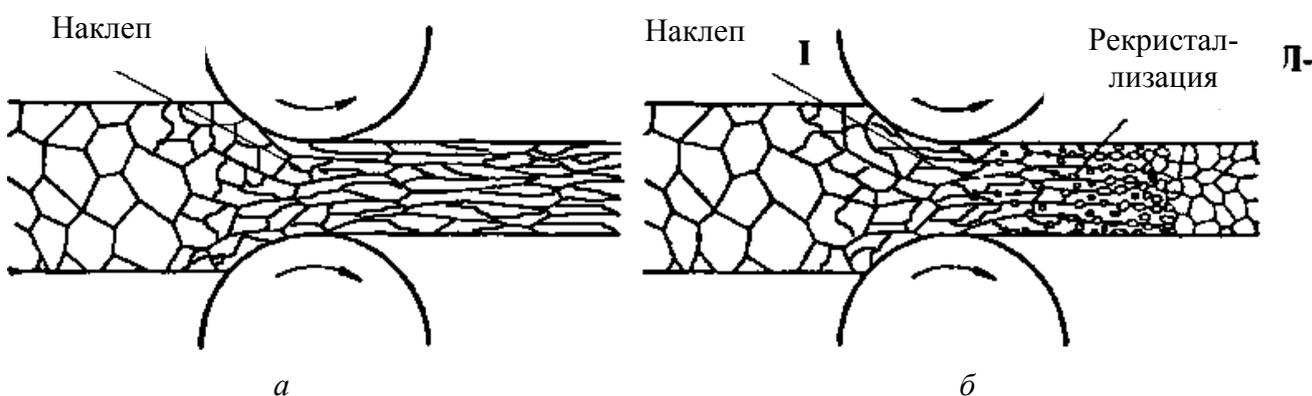


Рис. 6.9. Схемы изменения микроструктуры металла при деформации (прокатке):
а – холодной; б – горячей

Горячая деформация оказывает влияние на структуру и свойства металлов и сплавов. Если слиток загрязнен неметаллическими включениями, обычно располагающимися по границам кристаллитов, то в результате обработки металлов давлением неметаллические включения вытягиваются в виде волокон по направлению наиболее интенсивного течения металла. Эти волокна выявляются травлением и видны невооруженным глазом в форме так называемой *волокнистой макроструктуры*. Полученная в результате обработки давлением литого металла волокнистая макроструктура не может быть разрушена ни термической обработкой, ни последующей обработкой давлением. Последняя в зависимости от характера деформирования может изменить лишь направление и форму волокон макроструктуры.

Металл с явно выраженной волокнистой макроструктурой характеризуется анизотропией (вертикальностью) механических свойств. При этом характеристики прочности (предел текучести, временное сопротивление и др.) в разных направлениях отличаются незначительно, а характеристики пластичности (относительное удлинение, ударная вязкость и др.) вдоль волокон выше, чем поперек их.

В готовой детали, полученной из деформируемой заготовки, необходимо учитывать расположение волокон для формирования наилучших свойств. При этом необходимо, чтобы наибольшие растягивающие напряжения, возникающие в деталях в процессе работы, были направлены вдоль волокон. При работе какого-либо элемента этой детали на срез желательно, чтобы перерезывающие силы действовали поперек волокон; необходимо, чтобы волокна подходили к наружным поверхностям детали по касательной и не перерезались наружными поверхностями детали.

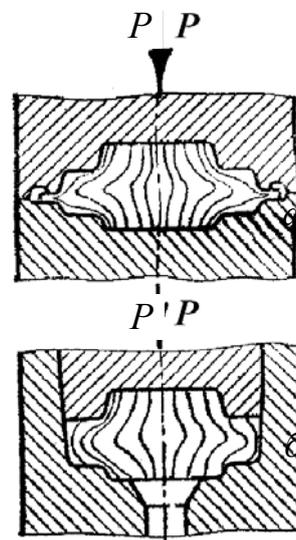


Рис. 6.10. Схемы процессов и расположения волокон в поковках при штамповке:
a – в открытых штампах; *б* – в закрытых штампах

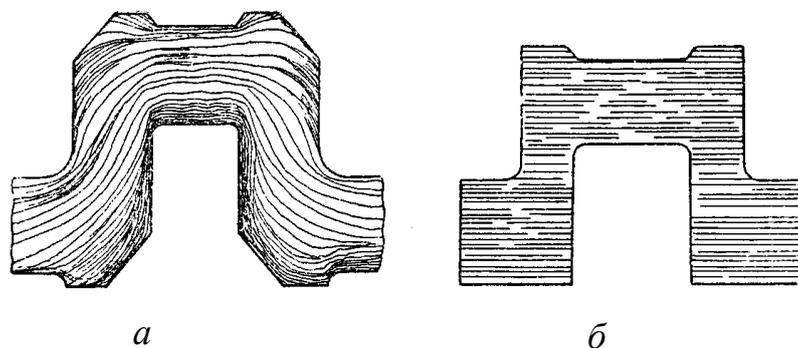


Рис. 6.11. Макроструктура продольно разрезанного коленчатого вала:
a – штампованный вал, волокна расположены по конфигурации изделия;
б – вал вырезан из проката, волокна перерезаны

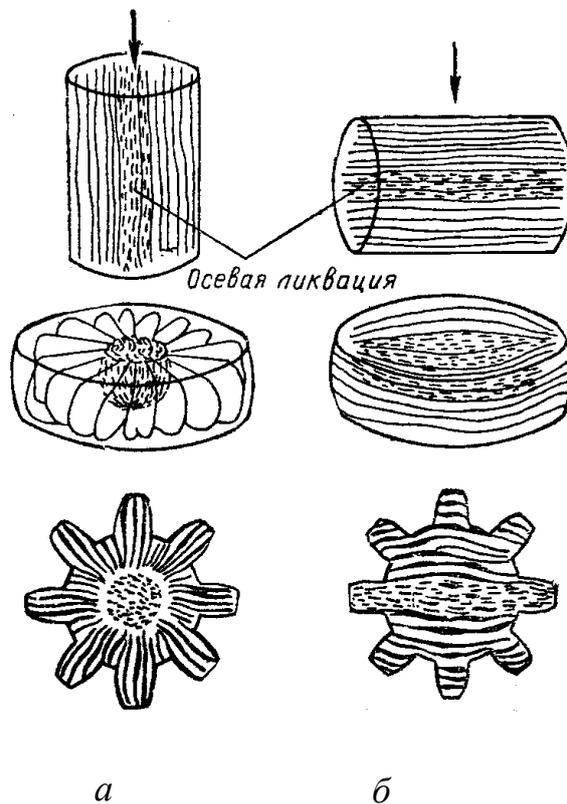


Рис. 6.12. Способыковки и макроструктуракованыхшестерен:
а – правильный способ; *б* – неправильный способ

Внешние нагрузки должны изгибать, а не расщеплять волокна металла. Кроме того, волокна при изготовлении заготовки и готовой детали не должны перерезаться, они должны огибать контур детали ([рис. 6.10](#) и [рис. 6.11](#)).

В поковках шестерен ([рис. 6.12, а](#)) волокна должны располагаться в радиальных направлениях, что обеспечивает максимальное сопротивление внешней изгибающей нагрузке от давления на зуб. Поэтому следует ковать или штамповать поковку для шестерни путем осадки в торец исходной прокатанной заготовки, имеющей долевое расположение волокон (при этом ликвационная зона удаляется при обработке отверстия), а не посредством осадки заготовки плашмя ([рис. 6.12, б](#)) с последующим округлением ее подкаткой по диаметру в вертикальном положении.

При ковке коленчатых валов ([рис. 6.11](#)) и крюков следует применять гибку в подкладных штампах, а не образовывать колено или крюк вырезкой газовым резаком или обработкой на станках. При ковке роторов турбин и генераторов из крупных стальных слитков рекомендуется чередовать осадку и вытяжку слитка для получения равномерных механических свойств в продольном и поперечном направлениях.

6.3. Влияние схемы напряженного состояния на пластичность

Напряженное состояние характеризуется схемой главных напряжений в малом объеме, выделенном в деформированном теле. При всем

многообразии условий обработки давлением в различных участках деформируемого тела могут возникнуть только четыре схемы объемно-напряженного состояния. При этом главные нормально направленные напряжения действуют во взаимно перпендикулярных плоскостях, на которых касательные напряжения равны нулю (рис. 6.13). При каждом виде обработки давлением одна из представленных схем является преобладающей. Наибольшая предельная деформация достигается при отсутствии растягивающих напряжений и увеличении сжимающих.

Прессование, прокатка, горячая объемная штамповка, ковка характеризуются всесторонним неравномерным сжатием. Эта схема нагружения наиболее благоприятна с точки зрения достижения максимальной степени пластической деформации.

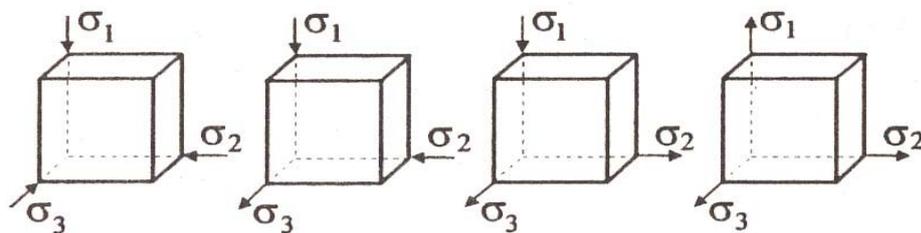


Рис. 6.13. Схемы объемно-напряженного состояния при обработке металлов давлением

При листовой штамповке и волочении реализуется схема двустороннего сжатия с растяжением.

В зависимости от действующих сил и соотношения их величин тело испытывает деформацию. Совокупность деформаций, возникающих по различным направлениям в пространстве, обычно называют *деформированным состоянием*.

6.4. Основные типы нагревательных устройств

Устройства для нагрева заготовок перед обработкой давлением разделяют на нагревательные печи и электронагреватели. Первые чаще всего используют для нагревания слитков, крупных и иногда средних заготовок. Электронагревательные устройства наряду с печами применяют для нагрева мелких и средних заготовок.

В печах передача тепла от стенок нагревательной камеры к заготовкам осуществляется излучением и частично конвекцией. В электронагревательных устройствах теплота выделяется в самом металле, который нагревается под воздействием электромагнитного поля (индукционный нагрев) или тока (электроконтактный нагрев).

Типы печей. В зависимости от источника энергии нагревательные печи бывают пламенные, получившие наибольшее распространение, и электрические. В пламенных печах тепло образуется при сгорании жидкого (мазута) или газообразного топлива. В электрических печах тепло образуется при прохождении тока через металлические и карборундовые сопротивления, смонтированные в стенках нагревательной камеры. Они используются преимущественно для нагрева цветных сплавов.

По принципу действия различают печи камерные и методические.

Камерные печи бывают переносными (для нагрева заготовок диаметром до 150 мм) и стационарными.

Рабочее пространство камерной печи 3 (нагревательная камера, [рис. 6.14, а, б](#)), выложенное огнеупорным кирпичом, нагревается при сжигании топлива с помощью двух форсунок 2 и имеет одинаковую температуру. Заготовки 1, устанавливаемые на под печи, загружаются и выгружаются через окно 5. Продукты сгорания отводятся через дымоход 4 и используются для нагрева до 200–300 °С поступающего в печь воздуха, что повышает КПД печи.

Печи для нагрева крупных заготовок оборудуют различными устройствами, облегчающими загрузку и выгрузку. Используют печи с толкателями, карусельные, конвейерные, с выдвижным подом.

Разновидностью камерных печей являются нагревательные колодцы, которые применяют для нагрева крупных слитков при прокате и ковке. В них заготовки располагают вертикально и загружают сверху краном.

Методические печи ([рис. 6.14, в](#)) предназначены для нагрева крупных заготовок под прокатку и используются в крупносерийном производстве. Печи характеризуются большой протяженностью (8–22 м) и наличием трех зон с различной температурой. Заготовки 1 ([рис. 6.14](#)), перемещаясь навстречу горячим газам вдоль печи, проходят зоны подогрева I (600–800 °С), максимального нагрева II (1350 °С), где происходит основное сгорание топлива с помощью форсунок или горелок 2, и зону выдержки III (1200–1300 °С), в которой выравнивается температура по сечению заготовки. Продукты сгорания с температурой 700 °С направляются в рекуператоры для подогрева воздуха. Заготовки с помощью толкателя 6 проталкиваются через печь по поду печи 7 и выгружаются через окно 8.

Электрические нагревательные устройства. Индукционный нагрев основан на возникновении в заготовке, помещенной в переменное электромагнитное поле, вихревых токов. Вследствие поверхностного эффекта (скин-эффекта) с ростом частоты тока толщина нагреваемого поверхностного слоя, в котором индуцируются вихревые токи, уменьшается. Поэтому при нагреве заготовок диаметром до 150 мм используется частота 500–8000 Гц, а для больших заготовок – 50 Гц. Индуктор в виде многovitкового соленоида по диаметру заготовки выполняют из медной трубки, охлаждаемой водой.

Электроконтактный нагрев, основанный на выделении тепла при прохождении тока через заготовку (по закону Джоуля – Ленца), применяют

при нагревании стальных заготовок диаметром до 75 мм. Используемое напряжение – 5–15 В, сила тока – до 5000 А. Концы заготовок, зажатые между медными токоподводящими контактами, нагреваются на 200–300 °С ниже средней ее части. Поэтому данный метод рационально использовать для нагрева стальных заготовок постоянного сечения и значительной длины.

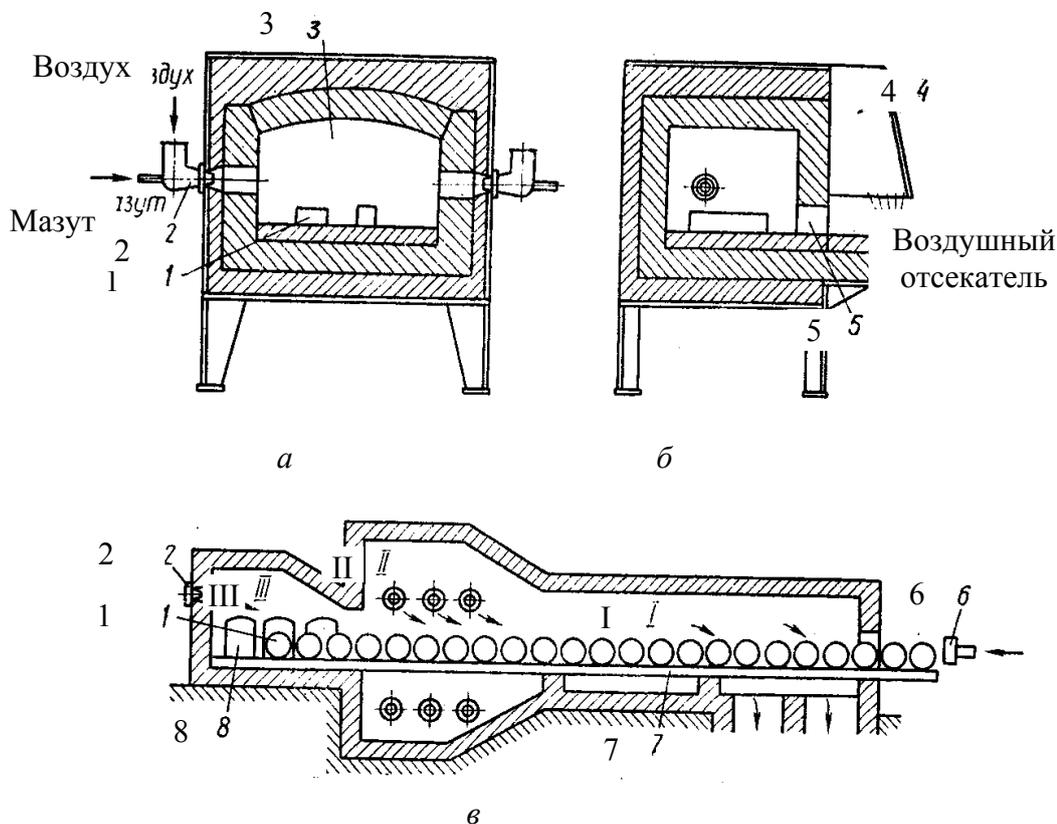


Рис. 6.14. Пламенные печи для нагрева заготовок:

а, б – камерная; в – методическая

Скорость электронагрева в 8–10 раз выше, а интенсивность образования окалины в 4–5 раз меньше, чем при нагреве в печах. Достоинствами электронагрева также являются улучшение санитарных условий труда и возможность автоматизации процесса. Недостатки: высокая стоимость высокочастотного генератора и необходимость замены индуктора с изменением размеров и формы заготовки при индукционном нагреве; низкая стойкость (до 1000 циклов) токопроводящих контактов при электроконтактном нагреве.

Режимы нагрева. Нагрев заготовок обычно происходит неравномерно. Вначале нагреваются наружные слои, а затем (за счет теплопроводности) – сердцевина. При большой разности температур поверхности и сердцевины возникают температурные напряжения (снаружи – сжимающие, внутри – растягивающие), которые могут привести к образованию трещин. Опасность их появления больше у легированных и литых сталей, у которых теплопроводность меньше, и возрастает с увеличением сечения заготовки.

Поэтому заготовки из легированных сталей и заготовки диаметром свыше 150 мм нагревают постепенно (методически), в два этапа: медленный нагрев и выдержка при температуре 700–800 °С, а затем нагрев до необходимой температуры с максимально возможной скоростью.

Окисление металлов. При нагревании стали выше 700 °С происходит интенсивное окисление поверхностного слоя с образованием окалины, состоящей из оксидов железа Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO . С повышением температуры до 1330–1350 °С окалина плавится и железо горит с образованием снопа ярко-голубых искр. Потери металла на окалину (угар) при однократном нагреве в пламенной печи составляют 1,5–2,5 %, при электронагреве – 0,4–0,7 %. Наряду с безвозвратными потерями металла, образование окалины в 1,5–2 раза повышает интенсивность изнашивания деформирующего инструмента, так как ее твердость выше твердости деформируемого металла.

При высоких температурах наряду с окислением железа происходит обезуглероживание поверхностного слоя стали вследствие выгорания углерода. Толщина обезуглероженного слоя составляет обычно 0,2–0,5 мм, достигая иногда 1,5–2,0 мм.

Для уменьшения окисления металла применяют электронагрев, а также нагрев заготовок в защитной атмосфере.

При высоких температурах нагрева, как было сказано выше, интенсивно растет зерно (перегрев). Перегретая сталь характеризуется более низкими механическими свойствами: уменьшение относительного удлинения и ударной вязкости составляет около 25 %. Структуру перегретой стали в большинстве случаев можно исправить отжигом.

При нагреве стали до температуры, близкой к температуре плавления, происходит интенсивная диффузия в нее кислорода, образование оксидов по границам зерен и расплавление легкоплавких межзеренных прослоек, что приводит к появлению трещин и потере пластичности. Такое явление называется *пережогом*. Оно не устраняется термической обработкой, и пережженный металл приходится отправлять на переплавку.

6.5. Методы получения машиностроительных профилей

6.5.1. Прокатное производство

6.5.1.1. Сущность процесса прокатки

Прокатка – это наиболее распространенный способ обработки металлов пластическим деформированием. Прокатке подвергают до 90 % всей выплавляемой стали и большую часть цветных металлов.

Прокатка – вид обработки давлением, при котором заготовка обжимается двумя вращающимися валками прокатного стана. При прокатке увеличиваются длина и ширина заготовки и уменьшается ее толщина. Относи-

тельное уменьшение толщины заготовки в процессе прокатки $\varepsilon = 1 - h_1/h_0$ (где h_0 и h_1 – толщина металла до и после прокатки) называется *относительным обжатием* или степенью деформации (в процентах). Максимальное значение относительного обжатия составляет 0,2–0,5. Уширение заготовки в процессе прокатки – 5–10 % за обжатие.

Отношение длины заготовки после прокатки l_1 к исходной l_0 , равное, если пренебречь уширением, отношению площадей поперечного сечения первоначального F_0 к полученному F_1 , называется *коэффициентом вытяжки* μ :

$$\mu = l_1 / l_0 = F_0 / F_1.$$

Это одна из характеристик процесса прокатки. Значение μ за один проход заготовки составляет обычно 1,1–1,6, а иногда достигает 2–2,5.

Различают три основных вида прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую.

При *продольной* прокатке (рис. 6.15, а) заготовка перемещается перпендикулярно к осям валков, которые вращаются в противоположных направлениях. До 90 % всего проката изготавливают продольной прокаткой (листы, полосы, прутки).

При *поперечной* прокатке (рис. 6.15, б) валки с параллельными осями вращаются в одном направлении и вращают заготовку, которая деформируется, перемещаясь вдоль оси валков.

Поперечно-винтовая прокатка (рис. 6.15, в) осуществляется валками, вращающимися в одном направлении и расположенными под углом один к другому. Такое расположение валков обеспечивает возникновение осевого усилия, перемещающего заготовку.

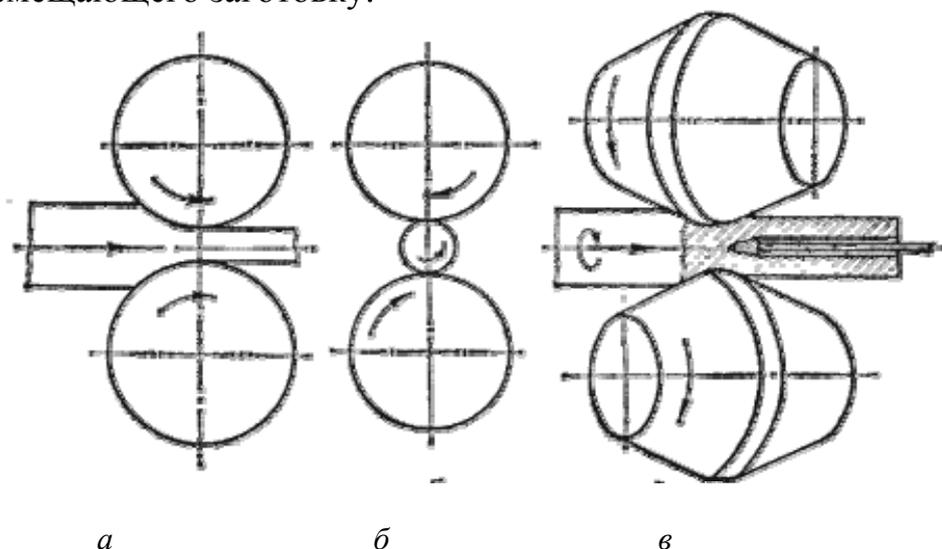


Рис. 6.15. Основные виды прокатки

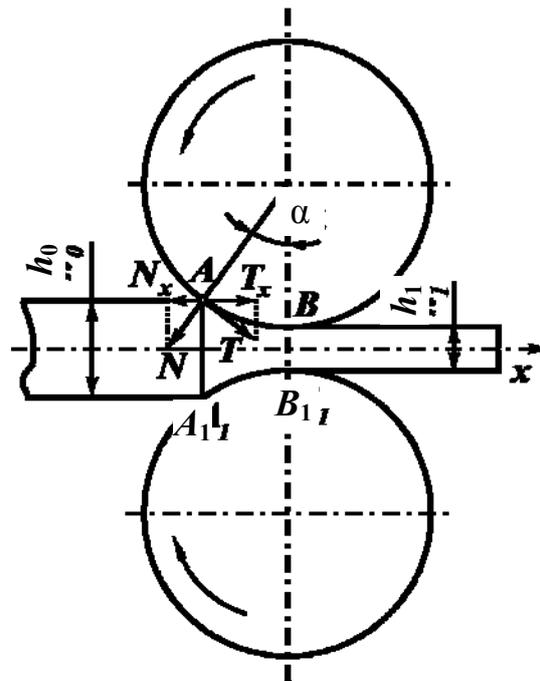


Рис. 6.16. Определение угла захвата заготовки прокатными валками

Поперечная и поперечно-винтовая прокатки применяются при изготовлении изделий с переменным по длине сечением. Принцип поперечно-винтовой прокатки используется также при прошивке трубных заготовок.

В процессе прокатки металл непрерывно втягивается в зазор между валками под действием сил трения T между металлом и валками. При этом сила трения должна иметь определенную величину, потому что при продольной прокатке на заготовку со стороны валков действуют нормальные силы N (рис. 6.16).

Деформация металла при прокате происходит на небольшом участке ABB_1A_1 , который называется *зоной деформации*. По мере вращения валков и перемещения заготовки вперед она передвигается по прокатываемому металлу. Дуга AB называется *дугой захвата*, а центральный угол α , отвечающий этой дуге, – *углом захвата*.

Спроектировав силу трения T и нормальную силу N на горизонтальную ось x , можно записать условие захвата металла валками как

$$T_x > N_x.$$

При этом условии результирующая сила будет направлена в сторону движения металла.

Условие захвата металла можно выразить и как $T \cos \alpha > N \sin \alpha$.

Выразив силу трения T через нормальную силу N и коэффициент трения f как $T = fN$ и подставив это выражение в условие захвата, получим

$$f \cos \alpha > \sin \alpha \text{ или } f > \operatorname{tg} \alpha.$$

Таким образом, для захвата металла валками необходимо, чтобы коэффициент трения между валками и заготовкой был больше тангенса угла захвата. Коэффициент трения можно увеличить применением насечки на валках.

При прокатке стали $\alpha = 20\text{--}25^\circ$, при горячей прокатке листов и полос из цветных металлов $\alpha = 12\text{--}15^\circ$, при холодной прокатке листов $\alpha = 2\text{--}10^\circ$.

Сортамент проката определяется совокупностью профилей и размеров прокатного металла. *Профилем* прокатного изделия называется форма его поперечного сечения.

По сортаменту продукцию прокатного производства можно разделить на следующие группы: сортовой прокат, листовой прокат, трубный прокат, специальный и периодический прокат.

Сортовая сталь делится на профили общего назначения – круглая, полосовая, квадратная, угловая, швеллеры, двутавровые блоки и др. (рис. 6.17, а) и профили специального назначения – рельсы и профили для автотракторостроения, судостроения, транспортного машиностроения и других отраслей промышленности (рис. 6.17, б).

Листовую сталь делят на тонколистовую (толщиной не более 4 мм) и толстолистовую. Некоторые сорта листовой стали предназначены для определенных отраслей промышленности, среди них выделяют сталь котельную, автотракторную, электротехническую и др.

Трубы разделяют на две группы: бесшовные (диаметром 30–650 мм) и сварные (диаметром 5–2500 мм). Кроме того, выпускают трубы фасонные и переменного сечения.

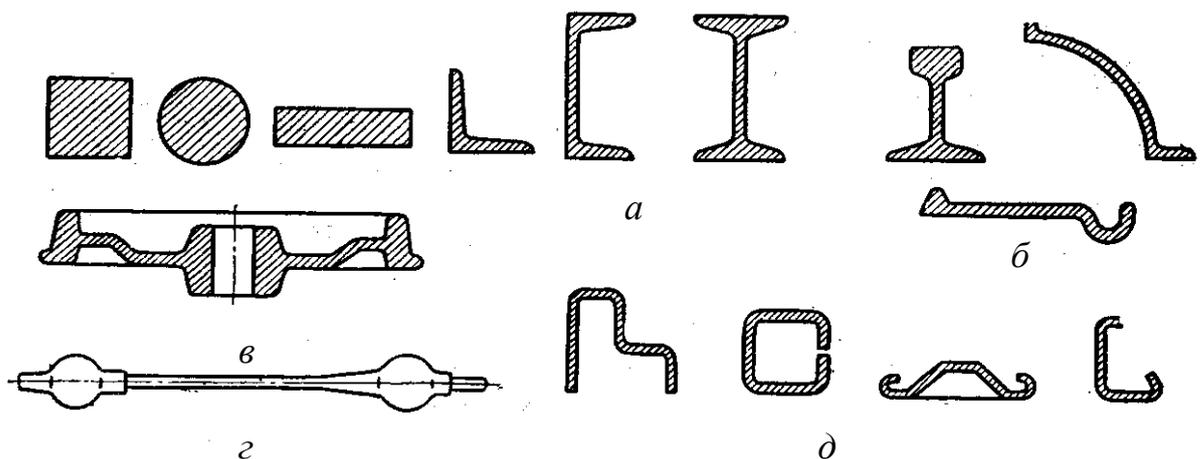


Рис. 6.17. Основные профили проката

К *специальным видам* проката относятся вагонные колеса (рис. 6.17, в), зубчатые колеса, шары, периодический прокат (рис. 6.17, з), а также гнутый профиль (рис. 6.17, д).

Заготовками для сортового проката являются блюмы (сечением от 150 × 150 до 450 × 450 мм), а для листового проката – слябы (толстые плиты толщиной до 350 мм).

6.5.1.2. Прокатные валки и станы

Прокатные валки – основной рабочий инструмент для прокатки. Они могут быть гладкими (рис. 6.18, а), калиброванными (ручьевыми) (рис. 6.18, б) и специальными.

Валки состоят из рабочей части бочки 1, шеек 2, треф 3, калиброванные валки имеют ручки 4 (рис. 6.18, а, б).

Шейки валков вращаются в подшипниках, а трефы предназначены для соединения валков с рабочими валами прокатных станов (шпинделями).

Гладкие валки применяют при прокатке листов, полос и т. д. На калиброванных валках прокатывают сортовой прокат.

На рабочей поверхности калиброванных валков имеются канавки – *ручьи*. Совокупность ручьев пары валков называется *калибром*. На каждой паре валков размещается несколько калибров. Калибры могут быть открытыми (рис. 6.18, в) и закрытыми (рис. 6.18, г).

Калибровка валков – это разработка схемы прокатки и размещения калибров, обеспечения получения заданного профиля проката при минимальном числе проходов. Одна из основных задач калибровки – расчет режимов обжатия при прокатке. По назначению калибры прокатных станов разделяют на обжимные (или вытяжные), черновые (или подготовительные) и чистовые (или отделочные).

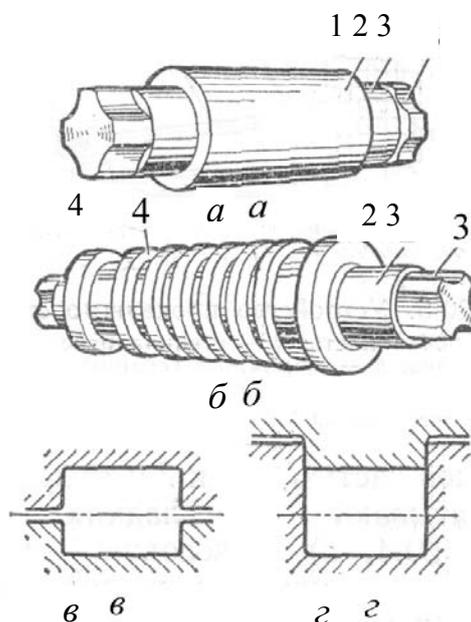


Рис 6.18. Прокатный валок: а – гладкий; б – калиброванный; в – открытый калибр; г – закрытый калибр

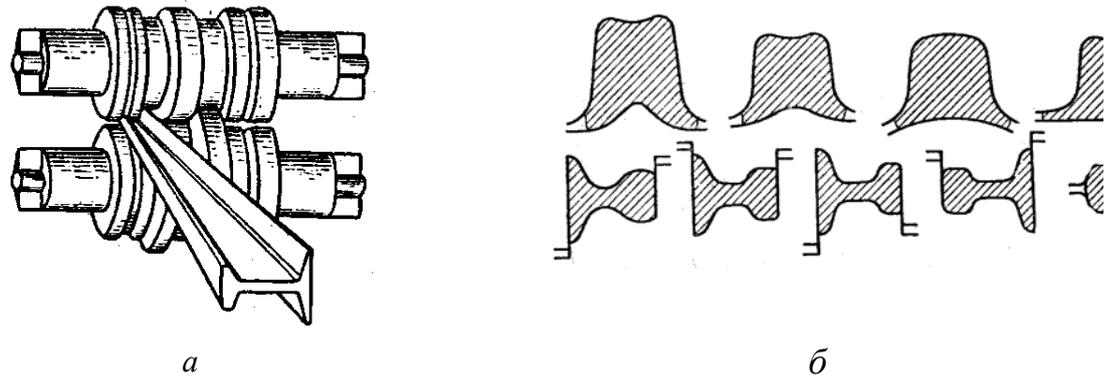


Рис. 6.19. Прокатные валки и система калибров для получения рельсов

Обжимные калибры предназначены только для уменьшения сечения прокатываемого металла. Чаще всего они имеют прямоугольную, квадратную, ромбическую и овальную формы.

В *черновых калибрах* уменьшается площадь, изменяется форма поперечного сечения прокатываемого металла с постепенным приближением к готовому изделию.

Чистовые калибры отличаются от прокатываемого профиля тем, что в них учтены коэффициент линейного расширения и допуски на размеры профиля.

Для прокатки одного и того же профиля, исходя из технико-экономических показателей, можно применить различные схемы калибровки. Например, при прокатке квадратного или круглого профиля наиболее часто используют системы калибров: ромб – квадрат, овал – квадрат или овал – круг. При передаче заготовки из ручья в ручей для улучшения обжатия ее кантуют на 90° .

Устройство прокатного стана. Прокатный стан состоит из одной или нескольких рабочих клеток и привода, включающего электродвигатель и передаточный механизм (рис. 6.20).

Рабочая клетка 1 состоит из станины 4 (рис. 6.20) и валков 3, установленных в подшипниках 2. Движение от электродвигателя 12 к валкам передается через муфту 11, редуктор 10, муфту 9, шестерную клетку 8 и шпиндели 6 и 7, которые соединены с валками треховыми муфтами 5.

Классификация прокатных станов. Прокатные станы классифицируют по трем признакам: назначению, числу и взаимному расположению клеток.

По назначению прокатные станы делят на станы для прокатки полупродукта (блюминги, слябинги и заготовочные станы) и станы для прокатки готовых изделий (сортовые, листопрокатные, рельсобалочные, трубопрокатные, для специального проката).

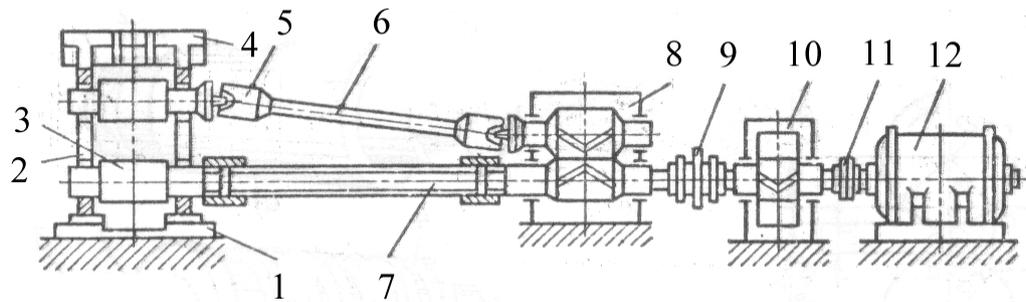


Рис. 6.20. Схема прокатного стана, расположение валков и рабочих клеток

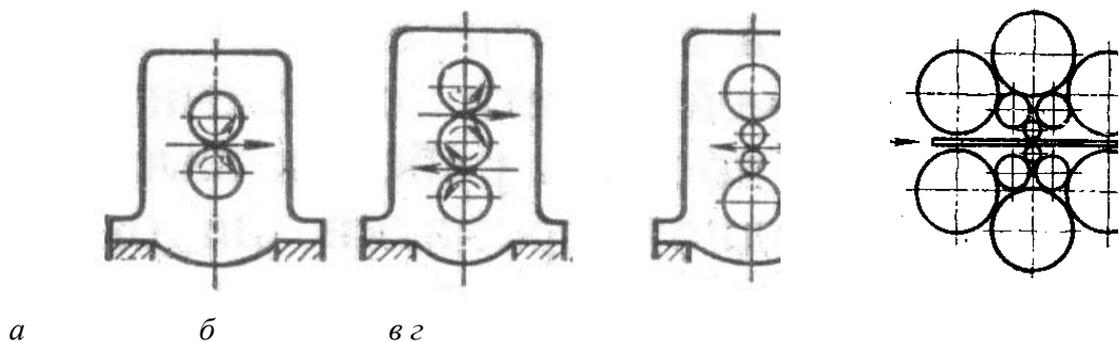


Рис. 6.21. Классификация прокатных станов по числу валков

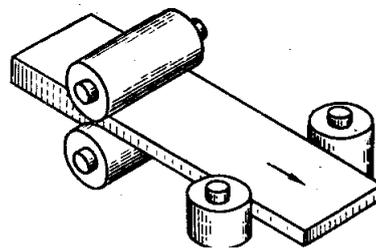


Рис. 6.22. Схема универсального прокатного стана

По числу и размещению валков в клетях станы бывают: с горизонтальными валками; универсальные с горизонтальными и вертикальными валками; с косо расположенными валками. Станы с горизонтальными валками по числу их в рабочей клетке подразделяют на двух-, трех- и многовалковые (рис. 6.21). Двухвалковые станы могут быть нереверсивные и реверсивные. На трехвалковых станах (рис. 6.21, б) заготовка в одну сторону идет между нижним и средним, а в обратном направлении – между средним и верхним валками. Двух- и трехвалковые станы применяют при производстве всех видов сортового проката и листов.

Многовалковые станы (рис. 6.21, в) имеют два рабочих валка малого диаметра, а остальные валки большего диаметра являются опорными. Они предотвращают прогиб тонких рабочих валков, благодаря чему повышается точность изделий. Такие станы применяют для горячей и холодной прокатки тонких листов и полос.

Универсальные станы (рис. 6.22) используют при прокате слябов, толстых листов и широкополочных двутавровых балок.

В зависимости от числа и взаимного расположения клетей прокатные станы могут быть одноклетьевыми и многоклетьевыми с линейным и последовательным расположением клетей.

6.5.1.3. Производство основных видов проката

Блюмы (заготовки квадратного сечения) и слябы (заготовки прямоугольного сечения) катают из слитков, размеры и форма которых зависят от марки сплава, вида полуфабриката и схемы прокатки. Полупродукт для получения сортового проката (блюмы) получают на крупных обжимных двухвалковых станах – *блюмингах*. Заготовки для листового проката (слябы) получают на крупном обжимном универсальном стане – *слябинге*.

При холодной прокатке тонколистовой стали, для снятия наклепа применяют промежуточный отжиг. Листы, предназначенные для холодной листовой штамповки, после отжига дополнительно прокатывают с обжатием 0,5–3 %.

Прокатка бесшовных труб. Заготовками для бесшовных труб являются слитки и катаные заготовки круглого сечения диаметром 120–320 мм. Производство бесшовных труб состоит из следующих операций: прошивка отверстия в заготовке и получение толстостенной гильзы; прокат трубы из гильзы; обкатка для улучшения наружной и внутренней поверхности трубы.

Толстостенную гильзу из заготовки получают поперечно-винтовой прокаткой с бочкообразными (рис. 6.15, е) валками, оси которых расположены под углом 4–14° одна к другой. Рабочие валки вращаются в одном направлении, при этом заготовка получает винтообразное движение. После прошивки и нагрева труба поступает в автоматические или пилигримовые (периодические) раскатные станы.

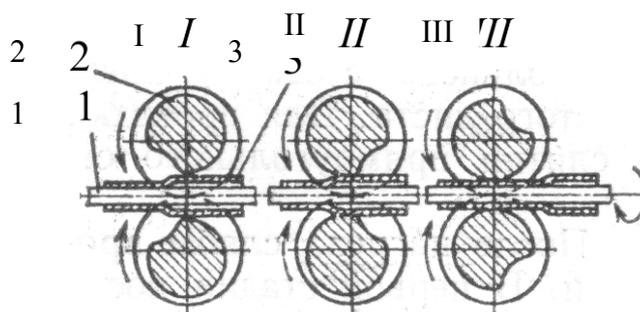


Рис. 6.23. Прокатка бесшовных труб

Рабочие валки 2 пилигримового стана (рис. 6.23) имеют калибр переменного сечения и вращаются в разные стороны с одинаковой скоростью. На части окружности валков размеры калибра в свету постепенно уменьшаются

и достигают на калибрующем участке размера, соответствующего наружному диаметру готовой трубы Z , на остальной части окружности размеры калибра резко увеличиваются, образуя холостой участок. При вращении валков профиль их калибра непрерывно меняется. Валки вращаются в разные стороны с одинаковой скоростью в направлении, обратном направлению подачи гильзы, одетой на оправку I . Гильза с оправкой движется на величину подачи в зазор между валками в момент, когда их ручки образуют холостой калибр (I), размеры которого больше наружного диаметра гильзы.

При последующем вращении валков сечение калибра уменьшается, а обжатие валками стенок трубы возрастает (II), при этом гильза вместе с оправкой перемещается в направлении, обратном подаче.

Окончательное выравнивание неровностей поверхности трубы производится калибрующей частью ручки (III). После полного оборота валков возвращается холостой калибр и в валки подается следующий участок гильзы, при этом она поворачивается на 90° вокруг продольной оси. Общее количество подач при прокатке – 140–180.

Производство сварных труб. Сварные трубы, диаметр которых достигает 2500 мм, значительно дешевле бесшовных, но не менее прочны. Заготовкой сварных труб служит лента или листы шириной, равной длине окружности трубы.

Технологический процесс изготовления сварных труб состоит из следующих операций: формовка плоской заготовки в трубу; сварка трубы; отделка и правка.

Формовку труб малого диаметра производят в ручьях валков непрерывного стана, а диаметром более 300 мм – на прессах или листогибочных валковых станах. После формовки применяют сварку следующих видов: непрерывную печную встык, контактную электрическую, электродугую под слоем флюса и др.

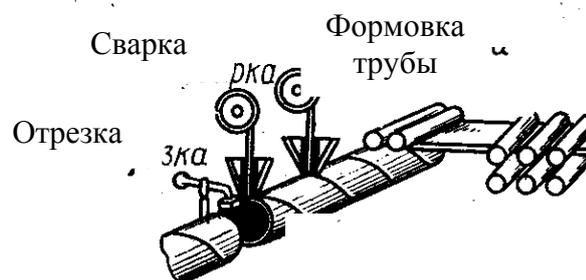


Рис. 6.24. Схема получения труб электродуговой сваркой под флюсом

Непрерывная печная сварка – высокопроизводительный способ получения дешевых труб диаметром 10–114 мм с толщиной стенки 1,8–5 мм (в основном водогазопроводных). Поступающая в рулоне полоса разматывается, правится, обрезается, сваривается электросваркой с задним концом предыдущего рулона и поступает в нагревательную туннельную

печь, где нагревается до 1300–1350 °С. Потом заготовка последовательно проходит через 6–12 клетей непрерывного стана, где происходит формовка и сварка прижатых в калибре одна к другой встык кромок трубы. Выходящая из стана труба разрезается пилой на куски 4–12 м и калибруется на калибровочном стане.

Электродуговой сваркой под слоем флюса изготавливают трубы диаметром 400–1800 мм с толщиной стенок 6–15 мм с прямым и спиральным швом (рис. 6.24).

6.5.1.4. Производство специальных видов проката

Прокатка деталей типа колес, бандажей и колец. Заготовкой для изготовления таких деталей служат слитки или круглый прокат. Технологический процесс их изготовления может включать операцииковки и прокатки. Например, на прессе производят осадку и прошивку заготовки, а формовку ступицы, диска и контура обода железнодорожных колес – на специальном колеснопрокатном стане (рис. 6.25, а).

Прокатка периодических профилей и деталей как один из самых экономичных методов формообразования заготовок деталей имеет особое значение. Периодические профили используют как заготовки для последующей штамповки или механической обработки, что обеспечивает экономию 20–30 % металла по сравнению со штамповкой из обычного проката.

Периодические профили изготавливают преимущественно поперечной и поперечно-винтовой прокаткой. Поперечная прокатка осуществляется на двух- или трехвалковых станах (рис. 6.25, б). Поперечно-винтовая прокатка деталей с винтовой поверхностью (червяков, ходовых винтов, червячных фрез и т. д.) в 30–80 раз производительнее, чем нарезание резьбы на токарно-винторезном станке, и обеспечивает экономию 10–30 % металла.

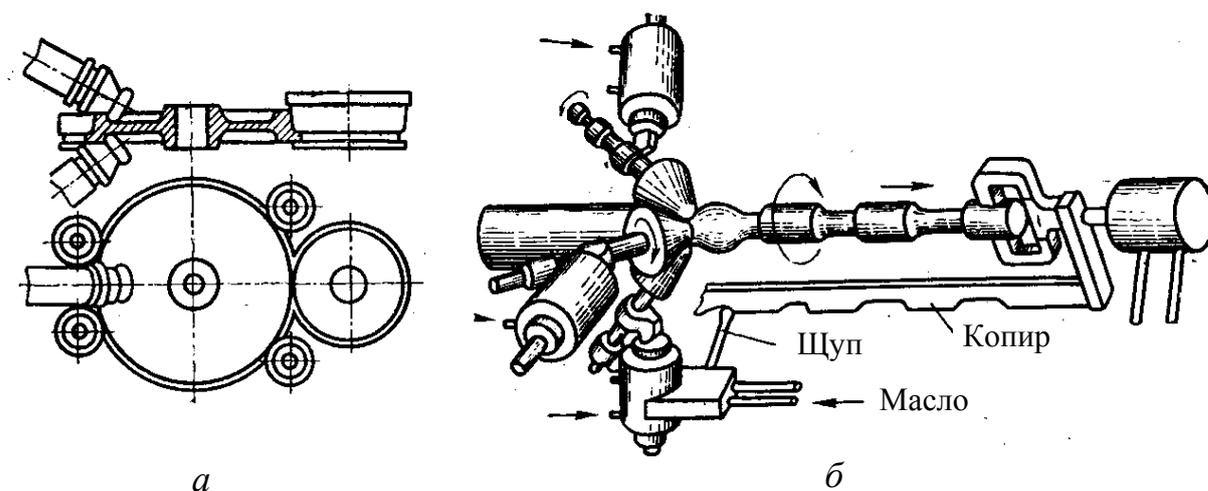


Рис. 6.25. Схемы получения некоторых специальных видов проката

На машиностроительных предприятиях для получения заготовок типа ступенчатых валков, втулок, осей, пальцев с малыми припусками все

большее применение находят деталепрокатные станы. Чаще всего в них используется принцип поперечно-клиновой прокатки, при которой заготовка прокатывается между двумя плитами и ручьями требуемой формы.

Производство гнутых профилей. Во многих случаях детали машин и конструкции из фасонных горячекатаных профилей имеют слишком большой запас прочности и оказываются чрезмерно материалоемкими, так как минимальная толщина стенок этих профилей – 2–3 мм. Легкие тонкостенные с высокой жесткостью так называемые *гнутые профили* различной формы получают гибкой из толстой полосы на специальных профилегибочных станах.

Изготовление гнутых профилей аналогично формированию заготовок сварных труб. При профилировании площадь поперечного сечения полосы остается неизменной, меняется только его форма. При этом в результате холодной деформации происходит упрочнение металла. Получают гнутые профили открытого типа, иногда весьма сложной формы (полузакрытого и закрытого типа).

Применение гнутых профилей обеспечивает уменьшение массы конструкции по сравнению с изготовлением их из горячекатаных фасонных профилей на 25–30 %.

6.5.2. Получение профилей методами прессования и волочения

6.5.2.1. Прессование

Прессование заключается в выдавливании металла из замкнутого объема через отверстие в матрице. Профиль прессованного изделия соответствует сечению этого отверстия. Прессование – высокопроизводительный и экономичный способ обработки металлов и сплавов, которым можно получать сплошные и полые профили (рис. 6.26). Прессованные изделия более точны, чем прокатанные профили.

Прессование металла происходит в условиях всестороннего неравномерного сжатия (рис. 6.26). При такой схеме деформирования металл наиболее пластичен. Поэтому прессованием можно обрабатывать как пластичные, так и малопластичные сплавы: медные, алюминиевые, магниевые, титановые сплавы, а также углеродистые и легированные стали и др. Недостатки процесса – значительные (иногда до 40 % от массы заготовки) отходы металла и интенсивный износ инструмента, особенно при прессовании сталей и других труднодеформируемых сплавов.

Прессованием получают прутки диаметром 5–250 мм, проволоку диаметром 5–10 мм, трубы с наружным диаметром 20–400 мм и толщиной стенки 1,5–12 мм и другие изделия. Благодаря гибкости, легкости переналадки на изготовление другого профиля прессованием, по сравнению с прокатыванием, выгоднее изготавливать малые серии профилей.

Методы прессования. Исходной заготовкой для прессования является слиток или круглый прокат. Различают прямое и обратное прессование.

При прямом прессовании (рис. 6.26, б) направление выхода металла через отверстие матрицы 5, закрепленной в держателе 6, совпадает с направлением движения пуансона 3, давление которого на заготовку 1 передается через пресс-шайбу 4. Часть заготовки, которая остается в контейнере 2, называют *пресс-остатком*. Масса его составляет обычно 8–12 % от массы слитка.

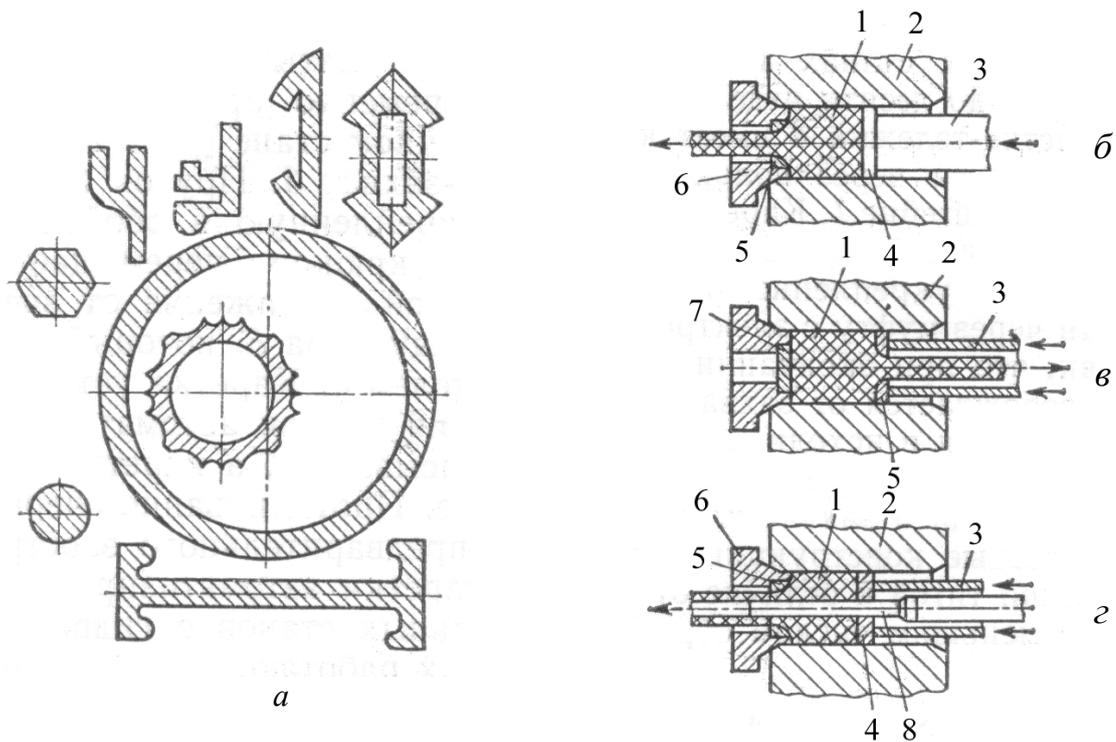


Рис. 6.26. Примеры прессованных изделий (а) и схемы прессования (б–z)

При прессовании труб заготовка сначала прошивается иглой 8 (рис. 6.26, z), проходящей через полый пуансон 3. При дальнейшем перемещении пуансона и пресс-шайбы 4 металл выдавливается в виде трубы через кольцевой зазор между стенками отверстия в матрице 5 и иглой 8.

При обратном прессовании (рис. 6.26, в) матрица 5 устанавливается в конце полого пуансона 3 и металл вытекает в направлении, обратном перемещению пуансона, так как сквозной выход закрыт заглушкой 7. Этот метод характеризуется меньшими отходами (масса пресс-остатка составляет 6–10 % от массы заготовки) и меньшим усилием прессования, но из-за сложности оборудования и ограниченной длины профилей он не находит широкого применения.

Оборудованием для прессования служат горизонтальные и вертикальные гидравлические прессы с усилием 3–250 МН с рабочим давлением жидкости до 40 МПа. В последнее время все большее применение (особенно при производстве изделий из труднодеформируемых сплавов) находит гидро-

прессование – прессование металлов под непосредственным воздействием давления жидкости до 2000 МПа и выше.

6.5.2.2. Волочение

Волочение заключается в протягивании (чаще всего в холодном состоянии) прокатанных или прессованных заготовок через отверстие в матрице (волоке), поперечное сечение которой меньше поперечного сечения заготовки (рис. 6.27). При протягивании прутка через отверстие с силой P возникают силы реакции N , которые обжимают заготовку.

Степень обжатия $q = (F_0 - F_1)/F_0$ (где F_0 и F_1 – площади поперечного сечения соответственно до и после волочения), допускаемая за один проход, зависит от обрабатываемого материала и составляет для сталей 10–19 %, для цветных металлов – до 36 %. Чтобы не было обрывов, напряжение при волочении не должно превышать 0,6 предела прочности материала заготовки. Для получения профилей необходимых размеров производят волочение за несколько проходов через ряд постепенно уменьшающихся отверстий. В результате холодной пластической деформации происходит упрочнение (наклеп) металла. Для снятия наклепа и повышения пластичности производят промежуточный рекристаллизационный отжиг.

Из различных сортов стали и цветных металлов волочением изготавливают проволоку диаметром 0,002–10 мм, разнообразные профили (рис. 6.27, а), калиброванные прутки диаметром 3–150 мм, холоднотянутые трубы диаметром до 500 мм и с толщиной стенки 0,1–10 мм достаточно высокой точности с блестящей гладкой поверхностью. Благодаря наклепу волочением можно повысить прочность и твердость металла.

Инструмент и оборудование для волочения. Инструментом для волочения служит волочительная матрица (волока). Волоки могут быть цельными, составными и роликowymi. Цельная волока I имеет отверстие, состоящее из четырех зон (рис. 6.27, б): смазочной воронки I, рабочего конуса II, калибрующего пояска III и выходного конуса IV. Угол рабочего конуса зависит от деформируемого материала и составляет 6–12°. Ширина калибрующего пояска обычно 2–10 мм. Волока изготавливается из инструментальных сталей, твердых сплавов и технических алмазов и устанавливается в обойме 2 (рис. 6.27, в).

Волочение производится на волочительных станах, в которых заготовки с помощью тянущего устройства протягиваются через отверстие матрицы.

Различают волочительные станы периодического действия с прямолинейным движением тянущего устройства (чаще всего цепные) и станы непрерывного действия (барабанные).

Скорость волочения достигает 10 м/с, а для тонкой проволоки – 40 м/с.

Волочение прутков, проволоки и труб. Основу технологического процесса составляет маршрут волочения, который показывает последовательное изменение размеров заготовки по проходам. Степень обжатия для

каждого прохода берется одинаковой, и по ней определяются количество проходов и диаметры калибрующих поясков отверстий волок. Например, при изготовлении стальной проволоки диаметром 0,5 мм из прутка диаметром 5 мм надо сделать 20 проходов и не меньше трех промежуточных рекристаллизационных отжигов (рис. 6.28, а).

Для удаления образующейся при отжиге проволоки окалины ее травят в растворе серной кислоты, затем промывают и сушат горячим воздухом.

Волочение труб производят двумя способами: для уменьшения только диаметра трубы – без оправки (рис. 6.28, з); для одновременного уменьшения диаметра и стенки трубы – с применением оправки (рис. 6.28, б, в).

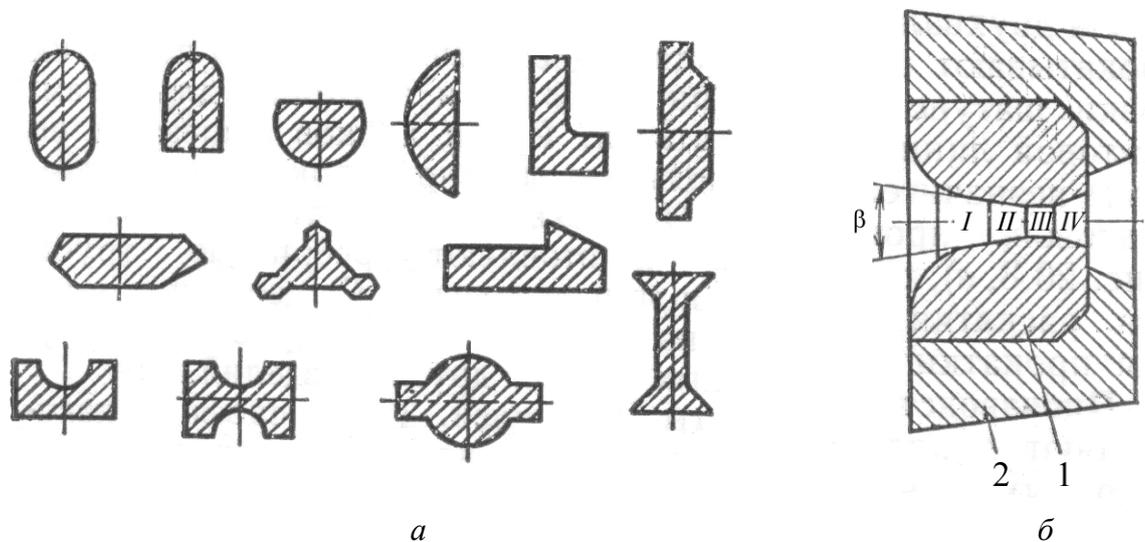


Рис. 6.27. Примеры профилей, получаемых волочением (а) и схема волок (б)

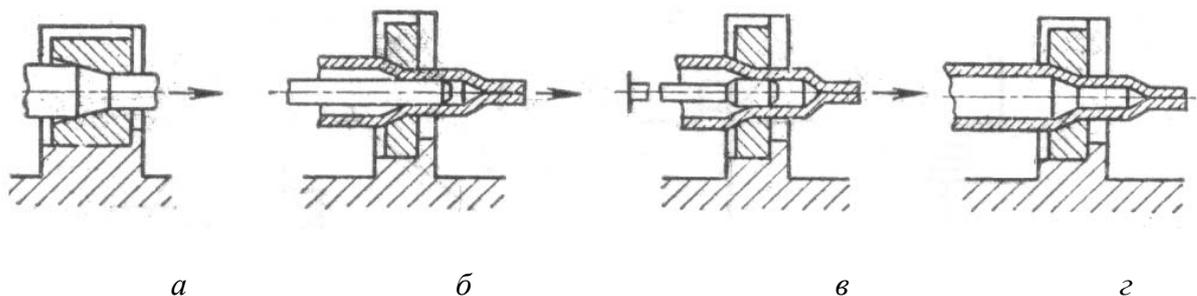


Рис. 6.28. Схемы волочения прутков (а) и труб (б–z)

Для уменьшения усилия волочения, износа инструмента и улучшения поверхности изделий применяют смазки: твердые, пластичные и жидкие. Некоторые изделия, от которых требуются высокие точность и качество поверхности, подвергают калиброванию при малой степени обжатия.

6.6. Методы получения поковок деталей машин

6.6.1. Ковка металла

Ковка – вид горячей обработки металлов давлением. С помощью действия универсального инструмента – бойков – заготовка, нагретая до температуры, составляющей 70–80 % температуры плавления, пластически деформируется, постепенно приобретая заданные формы, размеры и свойства.

Ковку делят на ручную и машинную. При ручной ковке нагретую заготовку помещают на наковальню и ударами молотка-ручника и кувалды ей придают нужную форму, используя при этом, как правило, подкладной инструмент (обжимки, подбойники и т. д.). Ручную ковку применяют на предприятиях только при изготовлении мелких поковок массой не более 8 кг при ремонтных работах. Выполнение ручнойковки требует высокой квалификации кузнеца, и этот процесс малопроизводителен.

При машинной ковке для создания энергии, необходимой для деформации заготовки, применяют ковочные молоты и ковочные гидравлические прессы. При ковке на молоте деформация заготовки происходит за счет кинетической энергии падающих частей молота, а при ковке на прессе – под действием жидкости высокого давления.

Изделие, полученное ковкой, называется *поковкой*. Поковка отличается от готовой детали размерами и часто формой (рис. 6.29). Чертеж поковки составляют на основании разработанного конструктором чертежа готовой детали с учетом припусков, допусков и напусков. *Припуск 2* – поверхностный слой металла поковки, подлежащий удалению обработкой резанием для получения требуемых размеров и качества поверхностного слоя готовой детали *1*. Размеры детали увеличивают на величину *припусков* в местах, которые подлежат обработке резанием. *Допуск 4* – допустимое отклонение от номинального размера поковки, т. е. разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами поковки. Допуск назначают на все размеры поковки. Конфигурацию поковки иногда упрощают за счет *напусков 3* – объема металла, добавляемого к поковке сверх припуска для упрощения ее формы. Напуски *3* удаляют последующей обработкой резанием. Отходы металла при получении детали из кованой поковки достаточно большие.

Ковка является экономически выгодной в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также единственно возможным способом изготовления поковок массой до сотен тонн. Заготовками для поковок служат слитки, блюмы и катаный прут. Чтобы получить качественную поковку, необходимо соблюдать технологический процесс ее изготовления.

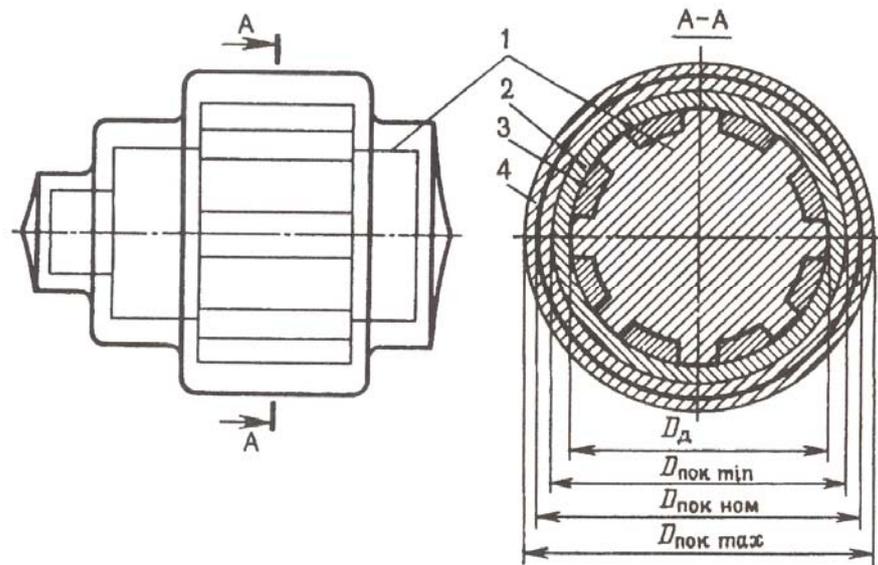


Рис. 6.29. Схема размеров поковки: 1 – детали; 2 – припуска; 3 – напуска; 4 – допуска

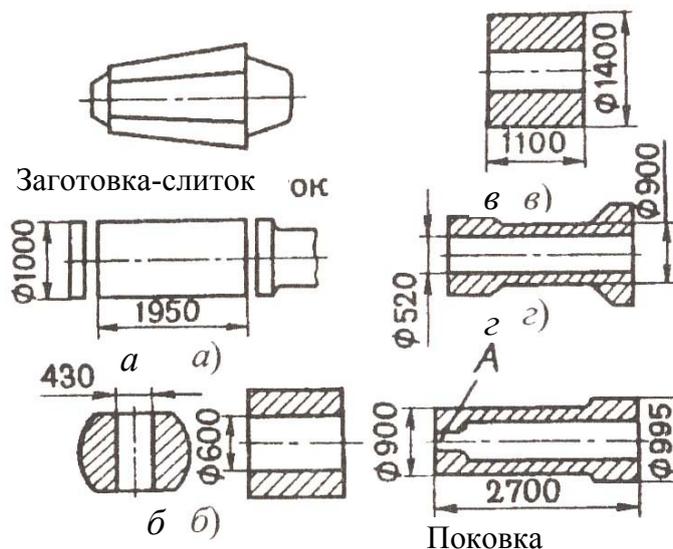


Рис. 6.30. Последовательность операцийковки полого цилиндра из слитка

Технологическим процессомковки называют совокупность действий, непосредственно связанных с изменением формы исходной заготовки, ее состояния и свойств, а также транспортированием от момента поступления заготовки в обработку до получения готовой поковки. Технологический процессковки состоит из операций и переходов, выполняемых в определенной последовательности.

Последовательность операцийковки устанавливают в зависимости от конфигурации поковки и технологических требований на нее, вида заготовки (слиток или прокат). В качестве примера на [рис. 6.30](#) приведена последовательностьковки полого массивного цилиндра из слитка на гидравлическом прессе. Цилиндр куют из стального слитка (сталь 40) массой 18 т с пяти

нагревов. После первого нагрева протягивают прибыльную часть под патрон и сам слиток на диаметр 1000 мм, отрубают донную и прибыльную части слитка (рис. 6.30, а). После второго нагрева выполняют осадку (рис. 6.30, б), прошивку отверстия и раскатку на оправке, после третьего нагрева – посадку на оправку и протяжку на длину 1100 мм (рис. 6.30, в), после четвертого – посадку на оправку и протяжку средней части на диаметр 900 мм (рис. 6.30, г). После пятого нагрева (нагревают только конец А) заковывают конец А.

6.6.1.1. Основные операции и инструмент ковки

Операцией называется законченная часть технологического процесса изготовления поковки, осуществляемая на одном рабочем месте.

К операциямковки относятся: протяжка, раскатка, разгонка, прошивка, передача, гибка, скручивание, осадка. Другие операции используются реже.

Протяжка – кузнечная операция, предназначенная для получения у поковки или ее отдельных частей меньшего поперечного сечения. Протяжку выполняют ударами молота или нажатиями пресса на верхний боек с подачей заготовки вдоль продольной оси (рис. 6.31). После каждого обжатия или серий обжатий заготовку поворачивают (кантуют) вокруг оси на 90° и деформируют по высоте, что ведет к удлинению заготовки. Ряд последовательных ударов называется *проходом*. Продольное перемещение заготовки, т. е. длина ее деформируемой части за каждое обжатие, называется *подачей l*.

Применяют различные схемы протяжки. Протяжку заготовок с прямоугольными или квадратными сечениями выполняют на плоских бойках тремя способами.

Первый способ – протяжка проходами. Последовательно делают обжатия 1–5 без промежуточной кантовки. Затем заготовку кантуют на 90°, аналогично выполняют обжатия 6–10 (рис. 6.31, а). Этот способ применяют для мелких и средних по массе заготовок из углеродистой и легированной стали.

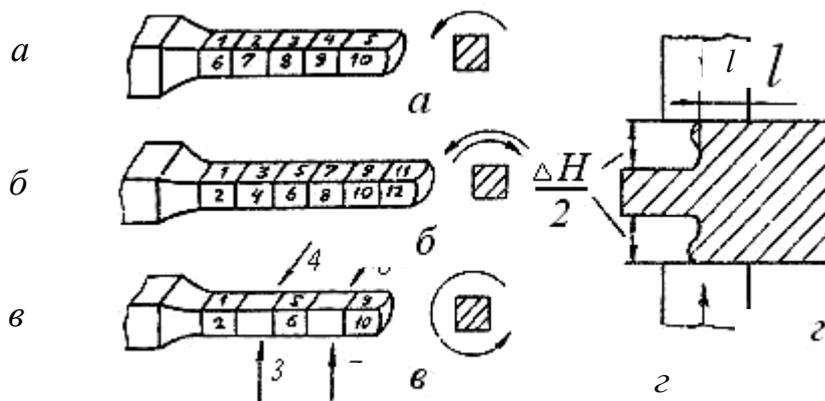


Рис. 6.31. Способы выполнения протяжки: а–в – последовательность выполнения; z – величина подачи при протяжке

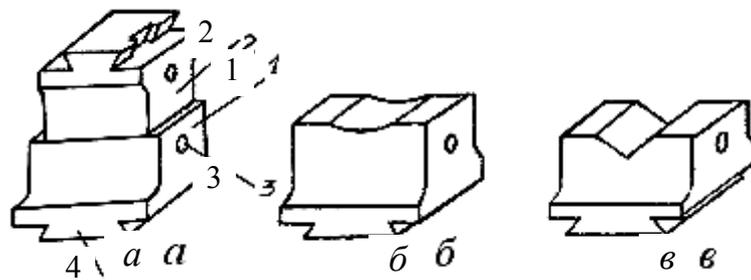


Рис. 6.32. Бойки различной формы: *a* – плоские: 1 – нижний; 2 – верхний; 3 – отверстия для транспортировки; 4 – хвостовик с клином для крепления; *б* – вырезные; *в* – комбинированные

Второй способ – протяжка кольцами. После каждого обжатия с одной и с другой стороны (переход) выполняют подачу и следующий переход. Кантовку производят при этом в обе стороны (рис. 6.31, б). Способ применяют дляковки крупных заготовок из углеродистых и легированных сталей.

Третий способ – протяжка по винту. После каждого обжатия заготовку кантуют в одну и ту же сторону на 90° , а после каждых четырех обжатий осуществляют подачу заготовки. Этот способ отличается большой трудоемкостью, его применяют при ковке твердой инструментальной стали, для уменьшения внутренних напряжений.

При изготовлении поковок с удлиненной осью (валы гладкие и ступенчатые, тяги, шатуны) протяжка является основной формообразующей операцией в технологическом процессе. При этом измельчается крупнозернистая структура исходной литой заготовки, завариваются внутренние дефекты и повышаются механические свойства металла.

Протяжку производят бойками различной формы: плоскими (рис. 6.32, *a*), вырезными (рис. 6.32, *б*), комбинированными (рис. 6.32, *в*).

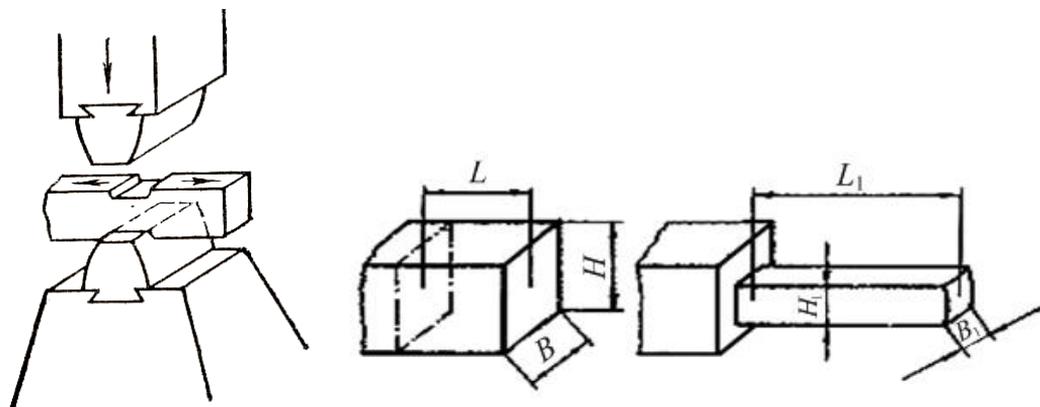


Рис. 6.33. Изменение формы размеров при протяжке

Вырезные (радиусные) бойки применяют дляковки заготовок круглого сечения. При ковке в вырезных бойках уширение практически отсутствует, а схема деформации приближается к неравномерному всестороннему сжатию, что позволяет ковать поковки из малопластичных сплавов.

Достоинства комбинированных бойков – их большая по сравнению с вырезными универсальность и возможность получения достаточной проковки металла по сечению.

При протяжке заготовка постепенно удлиняется и вместо исходных размеров B, H, L приобретает новые размеры – B_1, H_1, L_1 (рис. 6.33).

Интенсивность проковки металла выражается коэффициентом уковки $У$:

$$У = \frac{F}{F_1},$$

где F и F_1 – площади поперечного сечения заготовки до и после протяжки.

Для круглых заготовок

$$У = \frac{D^2}{D_1^2},$$

где D и D_1 – диаметры заготовки и поковки.

Чем больше уковка, тем лучше прокован металл, т. е. лучше его структура и механические свойства. Величина уковки для слитков из углеродистой и среднелегированной стали обычно принимается в пределах 2,5–3 и более. Для поковок, изготавливаемых из горячекатаной стали, достаточна величина уковки 1,3–1,5.

Величина относительного обжатия называется *степенью деформации* E . При каждом обжатии высота заготовки уменьшается на абсолютную величину деформации $\Delta H = H - H_1$. Степень деформации по высоте заготовки при обжатии

$$E_H = \frac{H - H_1}{H} = \frac{\Delta H}{H}.$$

Между уковкой как основной характеристикой величины деформации и величинами относительной деформации существует количественная зависимость

$$E_H = У - 1.$$

Разновидностями протяжки являются раскатка на оправке и разгонка.

Раскатка на оправке – одновременное увеличение наружного и внутреннего диаметра прошитой заготовки за счет уменьшения толщины ее сте-

нок S (рис. 6.34). Операцию выполняют при помощи узкого бойка и цилиндрической оправки. Оправка определенного диаметра d_0 заменяет нижний боек и опирается на две стойки. После каждого обжатия кольцо поворачивают на заданный угол. При обжимах кроме увеличения наружного и внутреннего диаметров происходит удлинение заготовки. Эту операцию применяют для изготовления поковок типа колец, зубчатых венцов, бандажей, различных обечаек и других деталей с тонкими стенками и большими отверстиями.

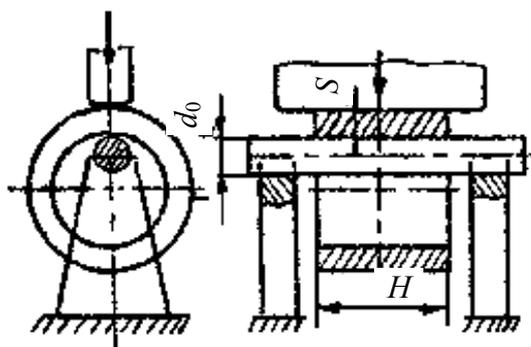


Рис. 6.34. Раскатка

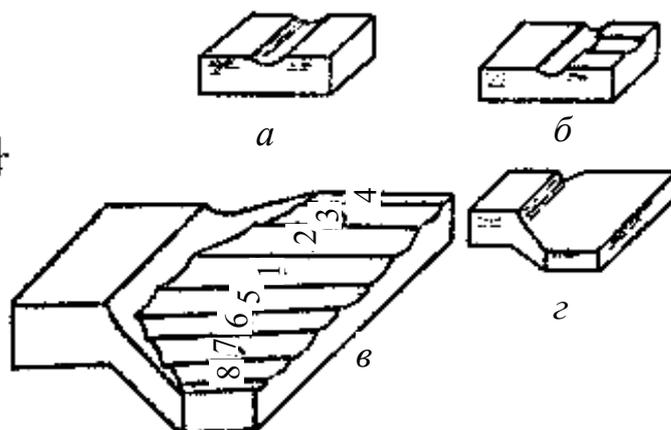


Рис. 6.35. Последовательность выполнения разгонки

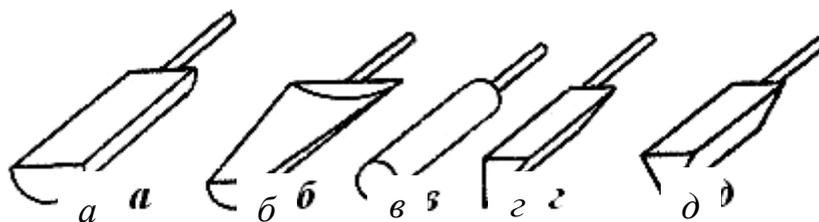


Рис. 6.36. Инструмент: а-в – раскатки; з, д – перезимки

Разгонка – увеличение ширины части заготовки за счет уменьшения ее толщины (рис. 6.35). Сначала на заготовке прямоугольного сечения (рис. 6.35, а) по предварительной разметке с помощью перезимки (рис. 6.36) делают пережим в расширяемой части заготовки металла. Затем посередине части заготовки, подлежащей уширению под углом 90° к сделанному пережиму, устанавливают раскатку (рис. 6.35, б), внедряют ее в заготовку. Заготовка начинает расширяться. Переставляя раскатку вправо от намеченного центрального углубления (рис. 6.35, в – увеличенный масштаб), а затем влево, постепенно разгоняют металл в ширину. После внедрения раскатки волнистую поверхность выглаживают плоским бойком (рис. 6.35, з).

Прошивка – это операция получения сквозных и глухих отверстий в заготовке за счет вытеснения металла (рис. 6.37). Инструментом для прошивки являются прошивки (рис. 6.38) – сплошные и пустотелые; последними прошивают отверстия большого диаметра (400–900 мм). Диаметр прошивки выбирают равным 1/2–1/3 наружного диаметра заготовки, при большом диаметре прошивки значительно искажается форма прошиваемой заготовки.

Прошивку пустотелым прошивком (рис. 6.37, а, б) применяют для получения отверстий диаметром больше 400 мм, при этом металл течет во внутрь полого прошивки. При внедрении прошивки на глубину 3/4–4/5 от высоты заготовки ее переворачивают и, ударяя широким торцом прошивки, получают сквозное отверстие. Вместе с прошивком из отверстия извлекают отходы (выдру). Эту операцию применяют также для удаления некачественной сердцевины слитка.

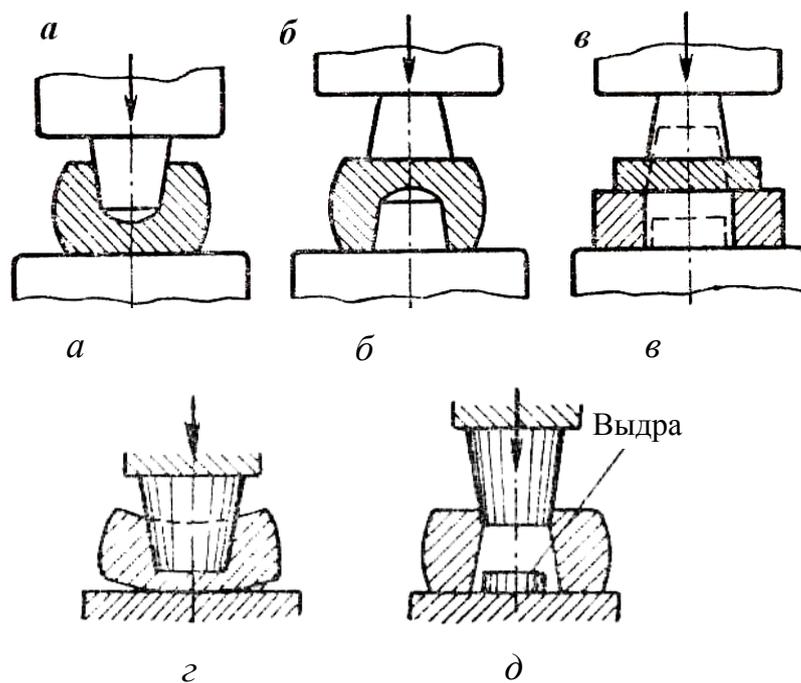


Рис. 6.37. Прошивка отверстий в поковках:
а–в – полым прошивком; г, д – сплошным прошивком

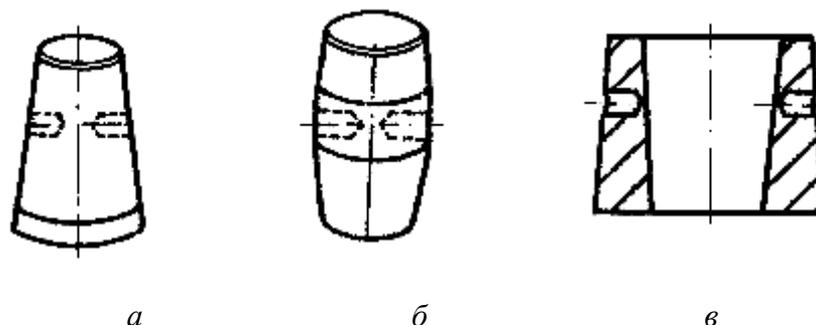


Рис. 6.38. Прошивки: а, б – сплошные; в – полый

Прошивка тонких заготовок (рис. 6.37, *в*) осуществляется с помощью подкладного кольца (установленного на нижнем бойке), в которое удаляется выдра после удара по заготовке прошивнем.

При прошивке сплошным прошивнем высоких поковок (рис. 6.37, *з*) осаженную заготовку устанавливают на нижнем бойке, а на нее по центру сверху – прошивень (рис. 6.38, *а*), торцом меньшего диаметра вниз. Слегка вдавливают прошивень в металл заготовки, а затем ударяют. При этом металл вначале выдавливается из-под прошивня в стороны (рис. 6.37, *з*) – получают глухое отверстие $3/4$ высоты заготовки. Затем заготовку поворачивают на 180° и ставят на нижний боек отверстием вниз, производят сквозную прошивку с обратной стороны (рис. 6.37, *д*). Полученная выдра по объему составляет лишь $1/4$ объема прошиваемого отверстия.

Для уменьшения трения между прошивнем и заготовкой получаемое углубление припыливают порошком молотого угля или графита.

Использование полого прошивня по сравнению со сплошным снижает усилие прошивки.

Отрубка – полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем внедрения в заготовку деформирующего инструмента – топора (рис. 6.39). Отрубку металла производят в горячем состоянии и применяют для отделения заготовок под ковку от прутков, для удаления прибыльной и данной части слитков и т. д.

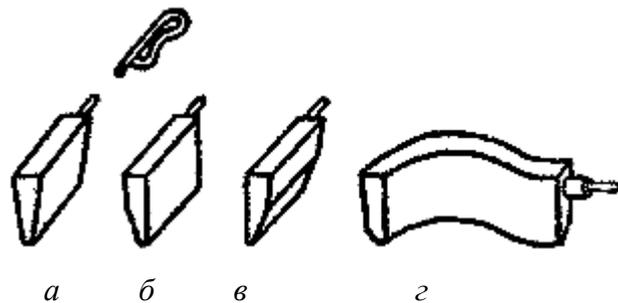


Рис. 6.39. Топоры для отрубки: *а* – двусторонний; *б* – односторонний левый; *в* – односторонний правый; *г* – фасонный

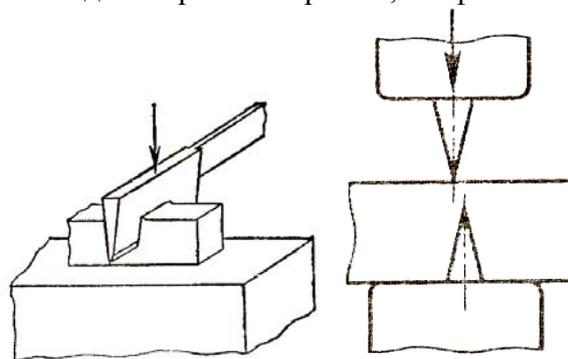


Рис. 6.40. Отрубка с поворотом заготовки

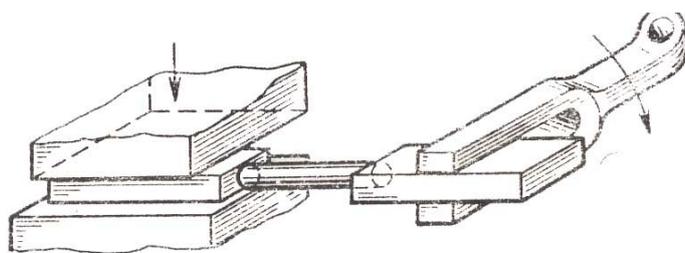


Рис. 6.41. Скручивание

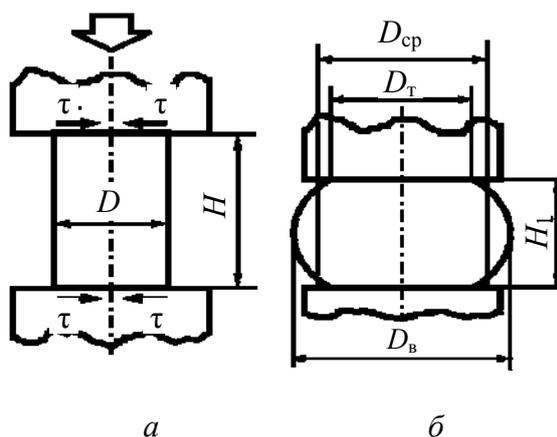


Рис. 6.42. Схема осадки: *а* – исходная заготовка; *б* – поковка после осадки

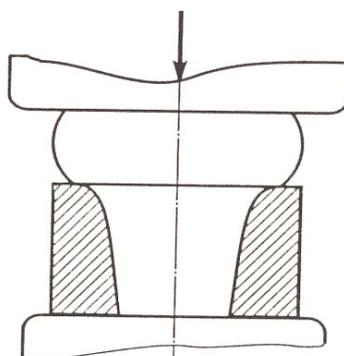


Рис. 6.43. Высадка

Применяют топоры двусторонние (рис. 6.39, *а*) и односторонние (рис. 6.39, *б, в*) – правые и левые. Последние обеспечивают меньший отход металла и меньшие припуски на механическую обработку. Вырубку дефектов с поверхности поковок выполняют фасонным топором (рис. 6.39, *г*).

При отрубке нагретую заготовку (рис. 6.40) располагают на середине нижнего бойка и измерительным инструментом или шаблоном намечают место установки топора. Топор верхним бойком внедряется на глубину, составляющую примерно 3/4 высоты заготовки. Затем заготовку поворачивают на 180° (рис. 6.40) и производят окончательное отделение части заготовки. Второй вариант отрубки выполняют без поворота заготовки: после

удаления топора из надрубленного места заготовки под перемышку укладывают квадрат и верхним бойком производят разделение материала.

Скручивание (закручивание) применяется для формирования колен поковки вала. Одно колено зажимают бойками молота, а на другое надевают вилку и медленно ее поворачивают ([рис. 6.41](#)).

Осадка – операция уменьшения высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения ([рис. 6.42](#)).

Осадку применяют:

для получения поковок с большими поперечными размерами при относительно малой высоте (зубчатые колеса, диски и т. п.);

как предварительную операцию перед прошивкой при изготовлении пустотелых поковок (колец, барабанов);

как предварительную операцию для уничтожения литой дендритной структуры слитка и улучшения механических свойств изделия.

Схема осадки под молотом цилиндрической заготовки ([рис. 6.42](#)) имеет диаметр D и высоту H . В результате действия сил трения τ на контактных поверхностях бойка и заготовки не только изменяются размеры заготовки, но и искажается ее форма: вместо цилиндра получается выпуклое (бочкообразное) тело с диаметром торцов D_T и диаметром выпуклой части D_B . В технологических расчетах обычно учитывают средний диаметр поковки исходя из условия постоянства объема:

$$D_{\text{ср}} = D \sqrt{\frac{H}{H_1}}$$

Высадка представляет собой осадку на части высоты заготовки. В зависимости от конфигурации поковки утолщение может располагаться как на конце, так и в средней части заготовки. Чаще всего при ковке на молоте утолщенной является концевая часть ([рис. 6.43](#)). В этом случае заготовку устанавливают на подкладное кольцо, диаметр отверстия которого несколько больше диаметра заготовки. Высадка производится ударами верхнего бойка до получения требуемых размеров фланца.

При нагреве средней по высоте части заготовки до более высоких температур получают осадку в этой зоне.

6.6.1.2. Оборудование дляковки

Деформирование металла на молотах происходит в условиях динамического характера приложения нагрузки (ударом). Падающие части молота в момент соприкосновения с поковкой (начало деформации) имеют максимальную скорость. В момент окончания деформации скорость падающих частей молотов равна нулю. Кинетическая энергия удара, $Dж$, для

молотов с неподвижным шаботом (крупная отливка из стали, к которой крепится нижний боек) составляет

$$E = \frac{mV^2}{2},$$

где m – масса падающих частей молота; V – скорость падающих частей в момент начала удара.

Основная часть кинетической энергии удара расходуется на деформацию металла, т. е. используется полезно. Остальная часть энергии теряется на упругие деформации частей молота, на сотрясение шабота и фундамента, на трение при движении падающих частей и т. д. Следовательно, КПД удара представляет собой отношение полезно используемой энергии A ко всей кинетической энергии удара E :

$$\text{КПД} = \frac{A}{E} = \frac{m_{\text{ш}}}{m + m_{\text{ш}}} (1 - k^2),$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса шабота; k – коэффициент восстановления, характеризующий степень упругости тела (в зависимости от марки стали $k = 0,3-0,7$).

Чем больше отношение $\frac{m_{\text{ш}}}{m}$, тем больше КПД удара. У ковочных молотов $\frac{m_{\text{ш}}}{m} = 10-15$, при этом КПД $\approx 0,7$.

Пневматический молот. Наиболее распространенная конструкция такого молота представлена на [рис. 6.44](#). В литой станине 10 расположены два цилиндра – компрессорный 9 и рабочий 5 , полости которых сообщаются через золотники 7 и 6 . Поршень 8 компрессорного цилиндра перемещается шатуном 14 от кривошипа 15 , вращаемого электродвигателем 13 через шестерни 11 и 12 (редуктор).

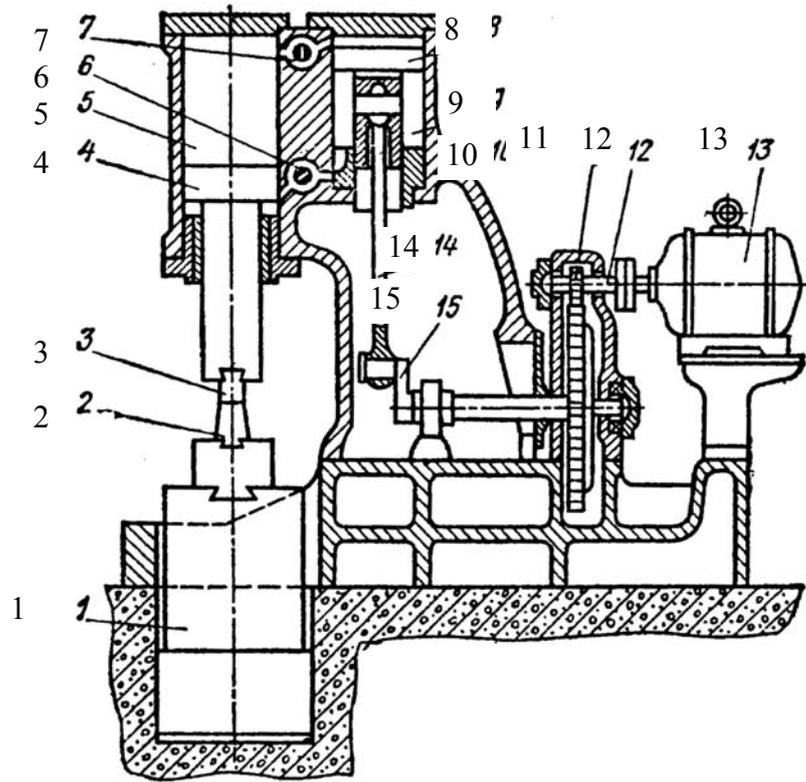


Рис. 6.44. Пневматический молот дляковки

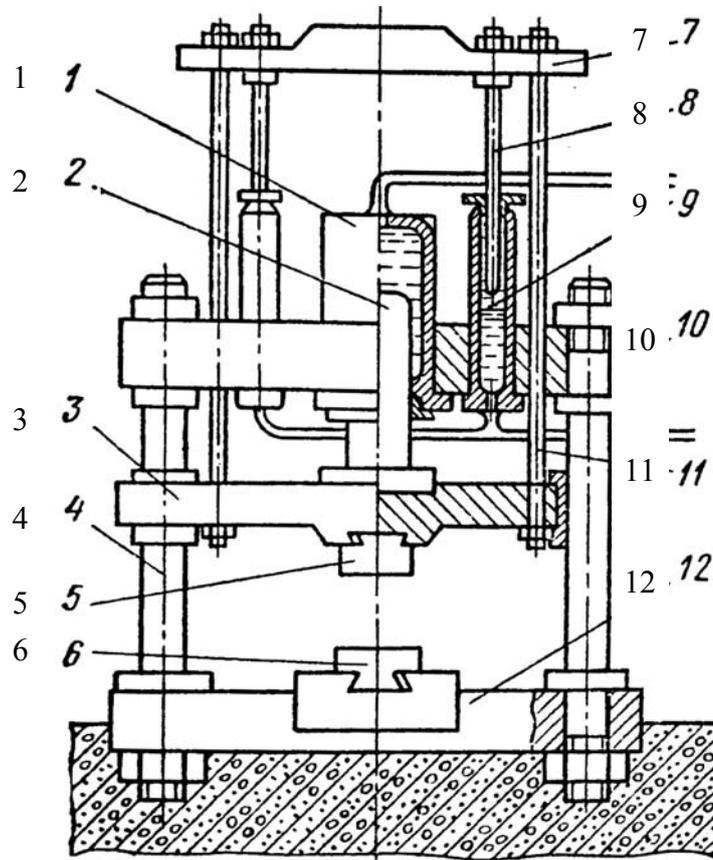


Рис. 6.45. Гидравлический ковочный пресс

При перемещении поршня в компрессорном цилиндре воздух поочередно сжимается в его верхней и нижней полостях. Воздух, сжатый до $0,2-0,3 \text{ МН/м}^2$, при нажатии на педаль или рукоятку, открывающую золотники 7 или 6, поступает через них в рабочий цилиндр 5 и воздействует на поршень 4 рабочего цилиндра. Поршень 4, выполненный цельно с массивным штоком, является одновременно бабой молота, к которой крепят верхний боек 3. В результате падающие части 3 и 4 периодически перемещаются вниз-вверх и наносят удары по заготовке, уложенной на нижний боек 2, который неподвижно закреплен на массивном шаботе 1. Пневматические молоты применяют дляковки мелких поковок (примерно до 20 кг) и изготавливают с массой падающих частей 50–1000 кг.

Гидравлические прессы – машины статического действия: продолжительность деформации может составлять от единиц до десятков секунд. В гидравлическом прессе усилие создается с помощью жидкости (водной эмульсии или минерального масла) высокого давления ($20-30 \text{ МН/м}^2$), подаваемой в рабочий цилиндр 1 (рис. 6.45).

Жидкость давит на плунжер 2, который передает усилие перемещающейся по колоннам 4 подвижной поперечине 3. Верхний боек 5 крепят к подвижной поперечине, нижний боек 6 устанавливают на нижней неподвижной поперечине 12. Верхняя неподвижная поперечина 10, в которой находится рабочий цилиндр 1, и нижняя поперечина 12 жестко соединены четырьмя колоннами 4. При опускании поперечины 3 жидкость из возвратных цилиндров 9 вытесняется плунжерами 8, связанными верхней поперечиной 7 и тросами 11 с поперечиной 3. Для подъема последней в исходное положение после рабочего хода жидкость под давлением подается в возвратные цилиндры 9 и из рабочего цилиндра вытесняется плунжером 2 в сливной резервуар.

6.6.2. Горячая объемная штамповка

Объемной штамповкой называют процесс получения поковок, при котором формообразующую полость штампа, называемую *ручьем*, принудительно заполняют металлом исходной заготовки и перераспределяют его в соответствии с заданной чертёжом конфигурацией.

Применение объемной штамповки оправдано при серийном и массовом производстве, поскольку обуславливает значительное повышение производительности труда, снижение отходов металла, обеспечивает высокую точность формы изделия и качество поверхности. Штамповкой можно получать очень сложные по форме изделия, которые невозможно получить приемами свободнойковки.

Объемную штамповку осуществляют при разных температурах исходной заготовки и, в соответствии с температурой, делят на холодную и горячую. Наиболее широкое распространение получила горячая объемная штамповка

(ГОШ), которую ведут в интервале температур, обеспечивающих снятие упрочнения.

6.6.2.1. Разновидности объемной штамповки

При объемной штамповке формоизменение заготовки происходит в полости специального инструмента (штампа). Деформация может осуществляться в горячем или холодном состоянии. Объемной штамповкой получают поковки разнообразной формы массой от нескольких граммов до 400 кг.

Объемная штамповка по сравнению с ковкой имеет следующие преимущества: возможность изготовления поковок более сложной формы с высоким качеством поверхности; уменьшение допусков на размеры и снижение припусков на механическую обработку в 2–3 раза; повышение производительности труда.

К недостаткам объемной штамповки относятся: ограничение по массе получаемых поковок; дополнительный отход металла в облой при штамповке в открытых штампах, достигающий от 10 до 30 % от массы поковки; более высокие силы деформирования; большая сложность и стоимость штампов, чем универсального инструмента дляковки.

В зависимости от типа штампа различают штамповку в открытых, закрытых штампах и в штампах для выдавливания.

Штамповка в открытых штампах (рис. 6.46, а) характеризуется тем, что зазор между частями штампа является переменным и уменьшается в процессе деформирования заготовки. В зазор вытекает излишек металла, который образует *облой*, необходимый для обеспечения полного заполнения ручья штампа.

Штамповка в закрытых штампах (рис. 6.46, б) отличается тем, что небольшой зазор между частями штампа обеспечивает их взаимную подвижность и в процессе деформирования заготовки остается постоянным. Отсутствие облоев в закрытых штампах сокращает расход металла и увеличивает коэффициент выхода годного (КВГ). Штампы с одной плоскостью разъема применяют для изготовления сравнительно простых изделий, в основном тел вращения. Для изготовления фасонных заготовок применяют штампы с разъемными матрицами (рис. 6.47). При этом требуется использование точных заготовок из калиброванных профилей или предварительно обработанных механической обработкой резанием.

Деформация заготовок в штампах для выдавливания (рис. 6.48) отличается тем, что расход металла на изготовление поковок снижается до 30 % по сравнению с расходом при штамповке в открытых штампах. Изделия получаются точные, максимально приближающиеся по форме и размерам к деталям. Поковки имеют высокое качество поверхности, так как процесс осуществляется в основном в холодном состоянии. Однако в этом случае

требуется тщательная подготовка исходных заготовок (профилей) под штамповку, высокая точность изготовления и наладки штампов, использование специальных смазок.

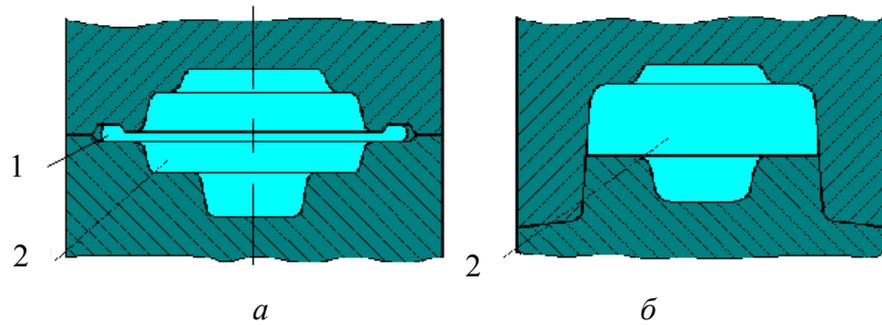


Рис. 6.46. Штампы: *а* – открытый; *б* – закрытый;
1 – облойная канавка; 2 – полость штампа

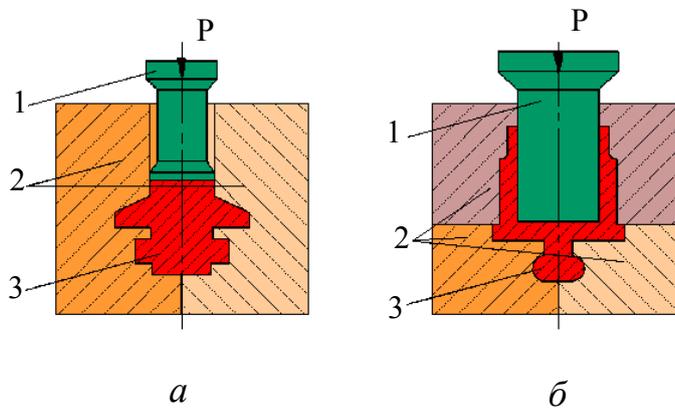


Рис. 6.47. Схема изготовления поковок в закрытых штампах с разъемной матрицей:
а – с вертикальной плоскостью разъема; *б* – с двумя плоскостями разъема;
1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – поковка

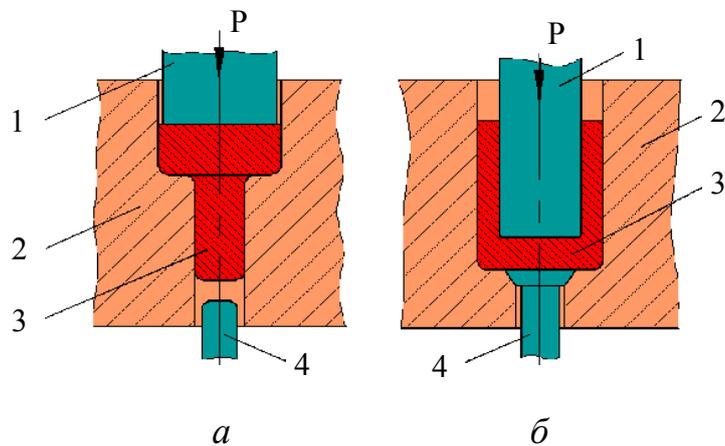


Рис. 6.48. Схемы штамповки в штампах для прямого (*а*) и обратного (*б*) выдавливания:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – поковка; 4 – выталкиватель

Заготовки для объемной штамповки. В подавляющем большинстве случаев в качестве заготовок для объемной штамповки являются профили круглого, квадратного и прямоугольного поперечного сечения, а также периодический прокат.

Профили из сплавов с пониженной пластичностью целесообразно деформировать в закрытых штампах и в штампах для выдавливания. В этом случае схема неравномерного всестороннего сжатия способствует повышению пластичности заготовок. Изделия из сплавов, у которых пластичность понижается при высоких скоростях деформирования (титановые, магниевые сплавы, а также высоколегированные стали), штампуют на гидравлических и кривошипных прессах. При этом для уменьшения остывания заготовки штампы подогревают до температуры 200–400 °С.

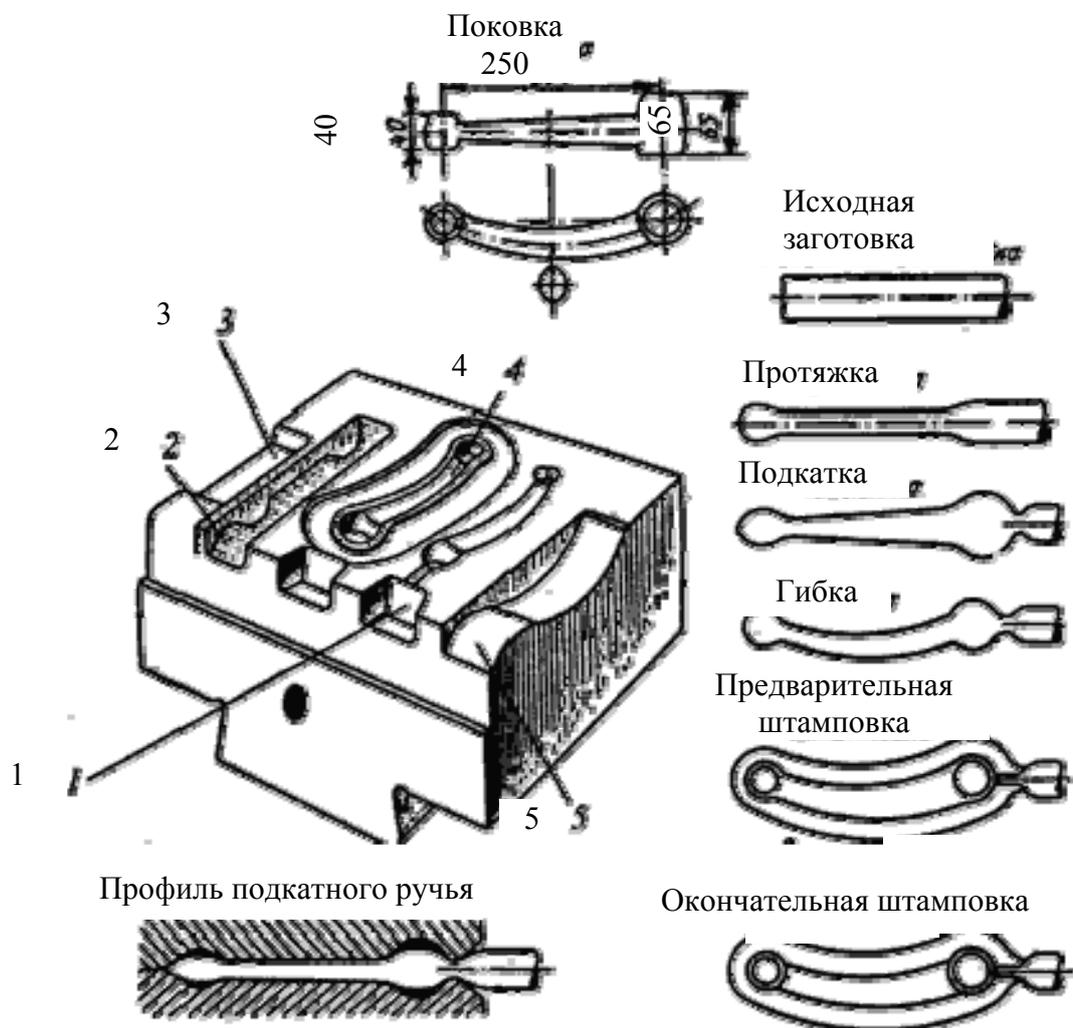


Рис. 6.49. Стадии получения сложной поковки в нескольких ручьях: 1 – черновой ручей; 2 – подкатной ручей; 3 – протяжной ручей; 4 – чистовой ручей; 5 – гибочный ручей

Фасонные заготовки чаще всего получают в заготовительных ручьях штампов. В зависимости от характера производства этот способ может осуществляться или в одном многоручьевом штампе (рис. 6.49), или в нескольких одноручьевых, установленных на отдельных штамповочных машинах.

Заготовительные ручьи. Основная операция ГОШ может быть выполнена за один или несколько переходов. При каждом переходе формообразование осуществляется специальной рабочей полостью штампа – *ручьем*. Переходы и ручьи делятся на две группы: заготовительные и штамповочные. Схема технологического процесса получения сложной заготовки в нескольких ручьях представлена на [рис. 6.49](#).

Заготовительные ручьи предназначены для фасонирования в штампах. *Фасонирование* – перераспределение металла заготовки с целью придания ей формы, обеспечивающей последующую штамповку с малым отходом металла.

К заготовительным ручьям относятся протяжной, подкатной, пережимной и гибочный, а также площадка для осадки.

Протяжной ручей предназначен для увеличения длины отдельных участков заготовки за счет уменьшения площади их поперечного сечения, выполняемого воздействием частых слабых ударов с кантованием заготовки.

Подкатной ручей служит для местного увеличения сечения заготовки (набора металла) за счет уменьшения сечения рядом лежащих участков, т. е. для распределения объема металла вдоль оси заготовки в соответствии с распределением его в поковке. Переход осуществляется за несколько ударов с кантованием.

Пережимной ручей предназначен для уменьшения вертикального размера заготовки в местах, требующих уширения. Выполняется за 1–3 удара.

Гибочный ручей применяют только при штамповке поковок, имеющих изогнутую ось. Служит для придания заготовке формы поковки в плоскости разъема. Из гибочного ручья в следующий ручей заготовку передают с поворотом на 90°.

При штамповке поковок, имеющих в плане форму окружности или близкую к ней, часто применяют осадку исходной заготовки до требуемых размеров по высоте и диаметру. Для этого на плоскости штампа предусматривают площадку для осадки.

Штамповочные ручьи предназначены для получения готовой поковки. К штамповочным ручьям относятся черновой (предварительный) и чистой (окончательный).

Черновой ручей предназначен для максимального приближения формы заготовки к форме поковки сложной конфигурации. Глубина ручья несколько больше, а поперечные размеры меньше, чем у чистового ручья (чтобы заготовка свободно укладывалась в чистой ручей). Радиусы скругления и уклоны увеличиваются. В открытых штампах черновой ручей не имеет облойной канавки. Применяется для снижения износа чистового ручья, но может отсутствовать.

Чистой ручей служит для получения готовой поковки, имеет размеры горячей поковки, т. е. больше, чем у холодной поковки, на величину усадки. В открытых штампах по периметру ручья предусмотрена облойная

канавка для приема избыточного металла. Чистовой ручей расположен в центре штампа, так как в нем возникают наибольшие усилия при штамповке.

Горизонтально-ковочная машина (ГКМ) представляет собой механический кривошипный штамповочный пресс, имеющий разъемную матрицу, одна часть которой является подвижной – зажимной.

Кроме главного деформирующего ползуна имеется ползун, движение которого перпендикулярно движению главного.

Горизонтально-ковочные машины выбираются по номинальному усилию, которое составляет 1–31,5 МН.

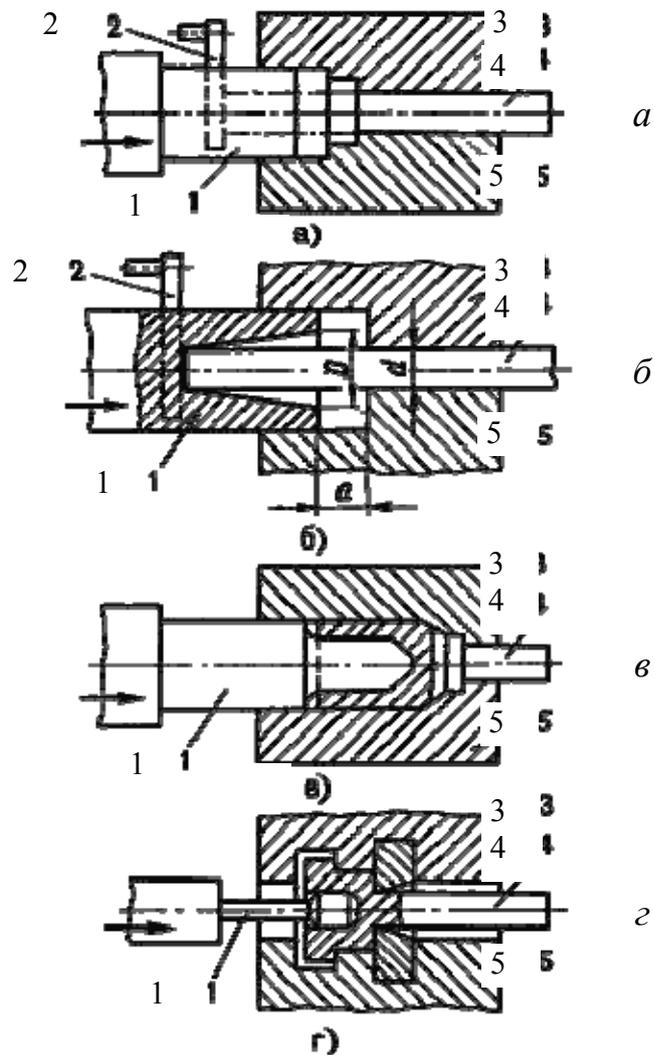


Рис. 6.50. Схемы операций при штамповке на горизонтально-ковочной машине:
а, б – высадка; в – прошивка; г – пробивка

Штамп ГКМ (рис. 6.50) состоит из трех частей: неподвижной матрицы 3, подвижной матрицы 5 и пуансона 1, размыкающихся в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Пруток 4 с нагретым участком на его конце закладывают в неподвижную матрицу. Положение конца прутка определяется упором 2. При включении машины подвижная матрица 5 прижимает

пруток к неподвижной матрице, упор автоматически отходит в сторону, и только после этого пуансон I соприкасается с выступающей частью прутка и деформирует ее. Металл при этом заполняет формующую полость, расположенную впереди зажимной части. Формующая полость может находиться либо в матрице, либо в пуансоне, либо совместно в матрице и пуансоне.

По окончании деформирования пуансон движется в обратном направлении, выходя из полости матрицы. Матрицы разжимаются, деформированную заготовку вынимают, или она выпадает из них.

Штамповка выполняется за несколько переходов в отдельных ручьях, оси которых расположены одна над другой. Каждый переход осуществляется за один рабочий ход ползуна.

Основные операции при штамповке на ГKM – высадка, прошивка, пробивка. За один переход можно высадить выступающий из зажимной части матрицы конец прутка только в том случае, если его длина не превышает трех диаметров. При большей длине возможен изгиб заготовки, поэтому предварительно необходимо произвести набор металла в полости пуансона, которой придают коническую форму.

В качестве исходной заготовки используют прутки круглого или квадратного сечения, трубный прокат. Штампуют следующие поковки: стержни с утолщениями и глухими отверстиями, кольца, трубчатые детали со сквозными и глухими отверстиями.

Достоинством ГKM являются малые напуски на поковки и штамповочные уклоны или их отсутствие (так как штамп состоит из трех частей). К недостаткам ГKM следует отнести их малую универсальность и высокую стоимость.

Ротационные способы изготовления поковок. В основе этих способов лежит процесс ротационного обжатия при вращении инструмента или заготовки. При обкатывании инструментом заготовки очаг деформации имеет локальный характер и постоянно перемещается по заготовке, вследствие чего усилие, действующее на инструмент, меньше, чем при штамповке. Это позволяет изготавливать поковки большой массы (заготовка вагонных осей) с большой точностью, так как упругие деформации при меньших усилиях меньше.

Штамповка на ковочных вальцах напоминает продольную прокатку. На двух валках закрепляют секторные штампы, имеющие соответствующие ручки (рис. 6.51, а). Нагретую заготовку I подают до упора 2 , когда секторные штампы 3 расходятся. При повороте валков происходит захват заготовки и обжатие ее по форме полости; одновременно с обжатием заготовка выталкивается в сторону подачи.

На вальцах изготавливают поковки типа звеньев цепей, рычагов, гаечных ключей и т. п., а также осуществляют фасонирование заготовок. Исходное сечение заготовки принимают равным максимальному сечению поковки, так как при вальцовке происходит главным образом протяжка.

Штамповка на ротационно-ковочных машинах подобна операции протяжки и заключается в местном обжатии заготовки по периметру (рис. 6.51, б). Заготовку 1 в виде прутка или трубы помещают в отверстие между бойками 5 машины, находящимися в шпинделе 4. Бойки могут свободно скользить в радиально расположенных пазах шпинделя. При вращении шпинделя ролики 3, помещенные в обойме 2, толкают бойки 5, которые наносят удары по заготовке. В исходное положение бойки возвращаются под действием центробежных сил. В машинах этого типа получают поковки, имеющие форму тел вращения.

Существуют машины, у которых вместо шпинделя с бойками вращается обойма с роликами; в этом случае для возвратного движения ползунов служат пружины. В таких машинах получают поковки квадратного, прямоугольного и других сечений.

Поперечно-клиновой прокаткой (рис. 6.51, в) получают заготовки валов и осей с резкими ступенчатыми переходами диаметром от 12 до 120 мм. Деформирование может осуществляться инструментом в виде двух валков, валка и сегмента или двух плоских плит.

Плоскоклиновой инструмент наиболее прост и обеспечивает получение валов сложной конфигурации с высокой точностью. Заготовка 2 из круглого прокатанного прутка после нагрева автоматически перемещается в рабочую зону клиньев 1 в их исходном положении.

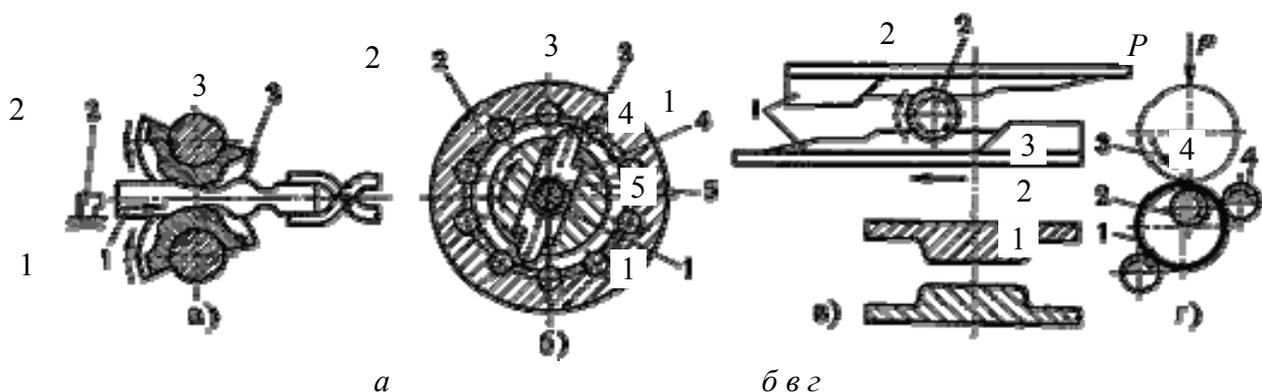


Рис. 6.51. Схемы действия ковочных вальцов (а), ротационно-ковочной машины (б), станов поперечно-клиновой прокатки (в), раскатки (г)

Клиновой инструмент, закрепленный в подвижной салазке стана, совершает прямолинейное движение. Заготовка прокатывается между двумя клиновыми плитами.

6.6.2.2. Конструирование заготовок, получаемых объемной штамповкой

Исходной информацией для конструирования поковки являются эскиз проектируемой детали с указанием на нем основных размеров и марки материала, программа выпуска детали, условия эксплуатации изделия, основные сведения о технологии обработки поковки после штамповки.

В начале проектирования определяют способ штамповки, который может влиять на конфигурацию, размеры и точность поковки. Способ обработки давлением выбирают исходя из конструктивно-технологических признаков детали, технико-экономических показателей различных способов объемной штамповки, программы выпуска изделия.

Затем определяют положение поверхности разъема штампа. При этом предусматривают возможность свободного извлечения поковки из полости штампа. Для этого площадь поперечного сечения выше и ниже поверхности разъема штампа должна уменьшаться по мере удаления за счет конструктивных особенностей изделия и конструктивных уклонов. Например, для шара поверхность разъема может проходить через диаметрально сечение фигуры 1–1 (рис. 6.52, а). Смещение поверхности разъема в положение 2–2 (рис. 6.52, б) приводит к напускам и искажению формы поковки. Для куба возможны три положения поверхности разъема штампов (рис. 6.52, в): плоскости 1 и 2 требуют напусков от штамповочных уклонов по четырем боковым поверхностям; плоскость 3 создает в каждой части штампа естественные откосы, т. е. конструктивные уклоны по двум плоскостям.

Для коротких цилиндров целесообразно применять разъем по плоскости 2 (рис. 6.52, г), для длинных – по плоскости 3 (рис. 6.52, д). При изготовлении поковок, имеющих форму усеченного конуса, используют вариант 1 для изделия небольшой высоты, а для поковок большой высоты – вариант 2 (рис. 6.52, е).

При изготовлении зубчатых колес предпочтительно расположение поверхности разъема по схеме, показанной на рис. 6.52, з, так как макро-структура поковки получается одинаковой у всех зубьев, что обеспечивает высокую и равномерную прочность.

В целях облегчения заполнения металлом полости штампа желательно выбрать полость разъема таким образом, чтобы полости штампа имели наименьшую глубину. При этом в процессе штамповки возможен сдвиг одной половины штампа относительно другой. Чтобы такой сдвиг можно было легко контролировать, плоскость разъема должна пересекать вертикальную поверхность поковки. Поэтому при изготовлении поковки в открытом штампе следует применять разъем по плоскости 2 (рис. 6.52, г). Желательно, чтобы поверхность разъема штампа была плоской (рис. 6.52, а): это обеспечивает относительно простое изготовление штампов.

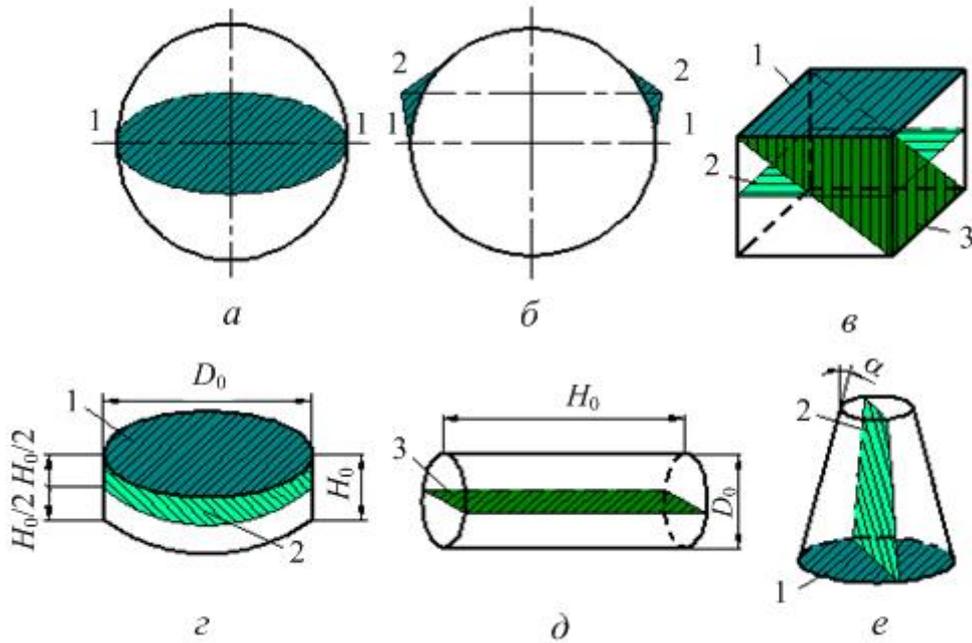


Рис. 6.52. Возможные положения поверхностей разреза штампов для простых геометрических фигур

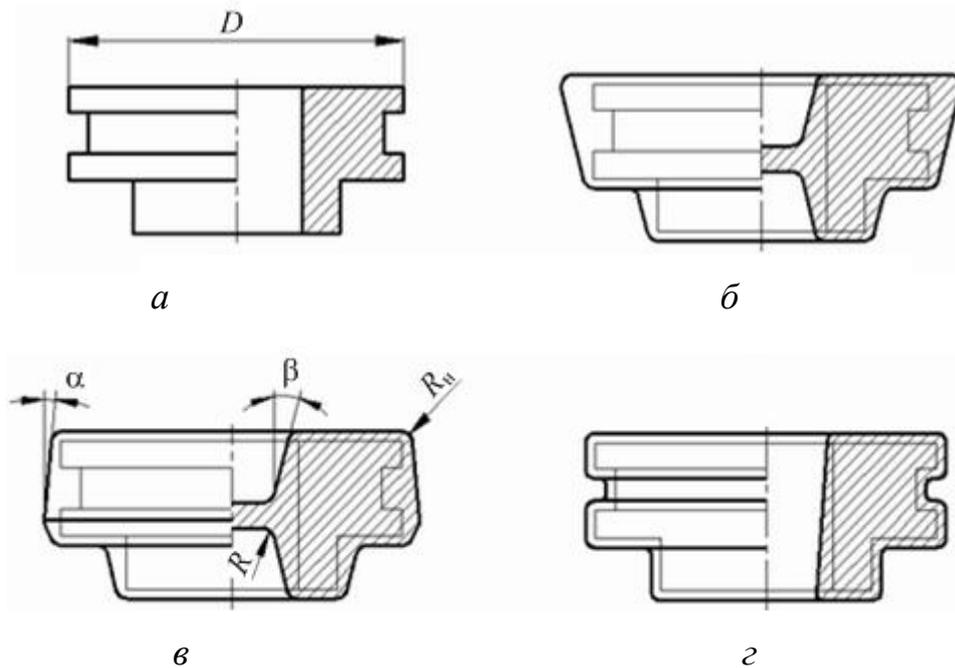


Рис. 6.53. Примеры составления чертежа поковки: *а* – деталь; *б* – поковка при штамповке в открытом штампе; *в* – то же, в закрытом штампе с одной плоскостью разреза; *г* – то же, в закрытом штампе с двумя плоскостями разреза

Затем рассчитывают массу поковки, увеличивая массу проектируемой детали примерно на 30 %, и устанавливают степень сложности поковки,

группу стали, а также напуски и припуски на механическую обработку поверхности изделия.

Напуски назначают на полости, впадины, выемки, которые нельзя получить штамповкой. К напускам относят штамповочные уклоны, радиусы закругления и перемычки отверстий (рис. 6.53).

Припуски на механическую обработку назначают в зависимости от исходного индекса (массы, группы стали, степени сложности, класса точности), линейных размеров и шероховатости поверхности поковки.

Допуски и допускаемые отклонения линейных размеров назначают в зависимости от исходного индекса и размеров заготовки.

Далее на поверхности поковок, параллельные движению инструмента, назначают штамповочные уклоны, которые необходимы для облегчения заполнения полости штампа и извлечения поковки. Внутренние уклоны β больше наружных α (рис. 6.53, б), значения которых зависят от формы и размеров полости штампов, глубины их полости, деформируемости материала поковки, способа штамповки, наличия выталкивателей в штампах.

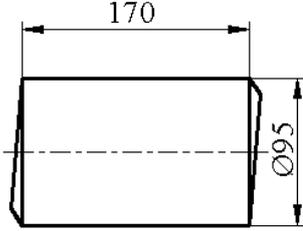
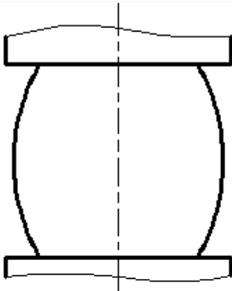
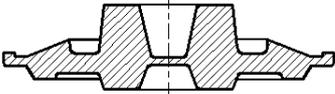
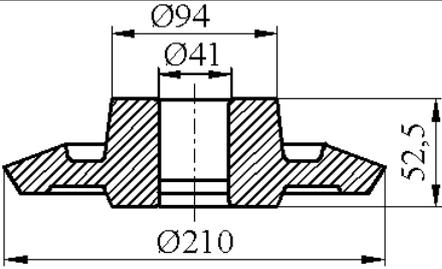
Радиусы закруглений назначают для уменьшения концентрации напряжений в углах ручьев штампа и улучшения заполнения штампа. Внутренние радиусы закругления R примерно в 3 раза больше наружных R_n (рис. 6.53, в).

При наличии в детали полости проектируют наметку отверстия. В этом случае, когда обработку давлением заготовок выполняют в штампах с одной плоскостью разреза, нельзя получить сквозное отверстие, поэтому необходимо предусмотреть в поковке наметку с тонкой перемычкой (пленкой). Толщина перемычки должна быть более 4 мм, так как при меньшем значении резко возрастают удельные силы, формирующие наметку. Обычно толщину пленки под прошивку принимают равной $S = 0,1d_{\text{отв}}$, где $d_{\text{отв}}$ – диаметр получаемого отверстия. При изготовлении тонких заготовок в наиболее тяжелых условиях работают выступы штампов, поэтому при $d_{\text{отв}} < 30$ мм наметку, как правило, не делают.

При штамповке поковок, имеющих в плане форму окружности, часто применяют осадку исходной заготовки до требуемого размера по высоте и диаметру. Для этой цели на плоскости штампа предусматривают площадку для осадки. В качестве примера в табл. 6.1 перечислены последовательность операций, оборудование и инструменты, применяемые при горячей объемной штамповке заготовки конического зубчатого колеса. Анализ эскизов поковок, полученных ковкой и объемной штамповкой (табл. 6.1), позволяет установить, что при одинаковых размерах исходной заготовки (профиля) деформация в штампах обеспечивает получение заготовок с меньшими допусками на размеры и припусками на механическую обработку.

Таблица 6.1

Последовательность изготовления поковки объемной штамповкой

Наименование операций и переходов	Эскизы переходов	Оборудование, инструмент
Отрезка заготовки		Ножницы, ножи
Нагрев заготовки	—	Индукционное нагре-вательное устройство
Осадка в заготовитель-ном ручье штампа		Молот; площадка для осадки молотового штампа
Штамповка в штампо-вочном ручье		Молот; открытый штамп
Обрезка обля, пробив-ка отверстия		Механический пресс; штамп, совмещенный для обрезки обля и пробивки отверстия

Рассмотренные правила и последовательность конструирования поковок, получаемых в открытых штампах с одной плоскостью разъема, в основном справедливы при изготовлении изделий другими способами штамповки. Вместе с тем каждый из способов имеет свои особенности. Например, при штамповке в закрытых штампах и штампах для выдавливания полость разъема обычно выбирают по наибольшей торцевой поверхности изделия. Штамповочные уклоны, как правило, назначают несколько меньше, чем при штамповке в открытых штампах.

Штампы с разъемными матрицами могут иметь две и более плоскости разъема (см. [рис. 6.47](#)). Поэтому поковки, получаемые с помощью такого

инструмента, в большинстве своем характеризуются меньшим объемом напусков и возможностью изготовления поковок со сквозными отверстиями. Кроме того, наличие двух плоскостей разъема не требует на поковках напусков там, где они необходимы в штампах с одной плоскостью разъема. Штамповочные уклоны назначают значительно меньшего размера, или их можно совсем не предусматривать.

Поковки, изготавливаемые холодной объемной штамповкой, имеют меньшие уклоны и радиусы закругления, чем при горячей объемной штамповке. Обычно под холодной штамповкой понимают обработку давлением без предварительного нагрева заготовки. Отсутствие окалины (толстой оксидной пленки) обеспечивает высокую точность формы, размеров и низкую шероховатость поверхностей заготовок. Это уменьшает объем механической обработки резанием при изготовлении деталей.

6.6.2.3. Обеспечение технологичности штампованной заготовки

Рациональной формой детали обычно считают такую, при которой все элементы конструкции имеют простую геометрическую форму и плавно сопряжены друг с другом. Размеры конструктивных элементов должны соответствовать возможностям конкретного технологического процесса. Рациональную форму штампуемой заготовки выбирают с учетом следующих основных положений:

- площадь поперечного сечения по длине изделия не должна изменяться более чем в 3 раза;
- нежелательно, чтобы заготовка имела переменную по длине толщину ребер;
- выступы и ребра не должны располагаться близко друг к другу, так как затрудняется течение металла в выступы и снижается стойкость штампов;
- при штамповке (высадке) утолщений на концах стержней диаметр высаженной части не должен быть больше четырех диаметров исходной заготовки, а высота высаженного утолщения должна превышать 0,05–0,125 диаметра утолщения;
- толщину тонкой стенки поковки, расположенной в плоскости разъема штампа, не следует проектировать менее 1,5 мм, так как в противном случае происходит ее быстрое остывание, ведущее к снижению стойкости штампа.

При изготовлении в открытых штампах поковок сложной пространственной формы расходуется много металла в результате его отхода в облой. Кроме того, штамповка сложных поковок отличается относительно низкой производительностью, так как требуется применение многоручьевых штампов. Конструкцию детали можно считать технологически рациональной, если она соответствует конструкции стандартизированного или унифицированного изделия, изготовление которого уже освоено. Более рациональной

можно сделать конструкцию заготовки, если взамен цельноштампованной детали сложной формы использовать сварную конструкцию, состоящую из элементов, штамповка которых с последующей сваркой является более эффективной.

Основными показателями высокой технологичности проектируемой детали являются:

- минимальный расход металла при штамповке, т. е. высокий коэффициент выхода годного (КВГ);
- отсутствие или небольшой объем последующей обработки поковки резанием, т. е. высокий коэффициент весовой точности (КВТ);
- минимальное количество технологических операций обработки давлением и низкая их себестоимость;
- высокая производительность на всех этапах производства;
- минимальное количество технологических операций обработки давлением, резанием и их низкая себестоимость;
- высокая стойкость штампов.

При конструировании детали следует проверить возможность изменения ее формы с целью повышения технологичности поковки. Для этого необходимо рассмотреть целесообразность получения заготовки в закрытом штампе вместо открытого. Суммарной оценкой технологичности конструкции обычно является себестоимость детали, которая в значительной степени зависит от программы выпуска изделий.

6.7. Холодная листовая штамповка

6.7.1. Общая характеристика процессов получения изделий из листовых заготовок

Листовой штамповкой изготавливают самые разнообразные плоские и пространственные изделия массой от долей граммов (например, секундная стрелка наручных часов) до десятков килограммов с размерами, составляющими несколько квадратных метров (корпус автомобиля, самолета и т. д.).

Преимуществом листовой штамповки является возможность получения изделий минимальной массы при заданных значениях прочности и жесткости (относительной толщины), что позволяет до минимума сократить отделочные операции. В качестве заготовки при листовой штамповке используют полученные прокаткой лист, полосу или ленту. Толщина листа при холодной штамповке составляет обычно не более 10 мм и только в редких случаях достигает 20 мм. Изделия из заготовок толщиной более 20 мм штампуют с нагревом (горячая листовая штамповка), что позволяет значительно уменьшить силы деформирования по сравнению с силами при холодной штамповке.

Материал, используемый для штамповки, должен не только отвечать требованиям эксплуатации, но и обладать высокой штампуемостью, т. е. способностью листовой заготовки деформироваться при формоизменяющих

операциях без разрушения. Однако одна и та же заготовка может допускать значительные пластические деформации при одной операции, а при других показывать худшую штампуемость. Это затрудняет поиск единых показателей (критериев) штампуемости, позволяющих по данным механических испытаний судить о возможном поведении заготовки во всех формоизменяющих операциях листовой штамповки.

Пригодность материала к вытяжным операциям (вытяжке, формовке) чаще всего определяют специальными испытаниями на глубину выдавливания лунки сферическим пуансоном на приборе Эриксона.

При листовой штамповке чаще всего используют: низкоуглеродистую сталь; пластичные легированные стали; медь; латунь, содержащую более 60 % меди; алюминий и его сплавы, титановые сплавы и др. Этим видом обработки давлением получают изделия из листовых неметаллических материалов, таких как кожа, целлулоид, органическое стекло, фетр, текстолит и др.

6.7.2. Основные технологические операции листовой штамповки

Все технологические операции листовой штамповки целесообразно разделить на две группы. К первой группе относятся операции, при которых заготовка в процессе деформирования доводится до разрушения. Эти операции принято называть *разделительными*. Ко второй группе относят формоизменяющие операции, при которых деформирование заготовки не должно сопровождаться разрушением. Для формоизменяющих операций кромки инструмента (пуансона, матрицы) имеют радиусы закруглений, значительно превышающие толщину заготовки, а зазор обычно несколько больше ее толщины.

При технологических операциях, обеспечивающих заданный характер формоизменения, пластические деформации имеют место лишь в части заготовки, которую называют *очагом деформации*. При выполнении разделительных операций стремятся к максимальной локализации очага деформации, чтобы уменьшить искажения при деформировании и быстрее исчерпать ресурс пластичности. При выполнении формоизменяющих операций увеличивают размеры очага деформации, чтобы уменьшить опасность разрушения.

В классическом виде операции штамповки выполняют с помощью двух рабочих инструментов – пуансона и матрицы. *Пуансоном* называют инструмент, охватываемый заготовкой, а *матрицей* – инструмент, охватывающий заготовку в процессе деформирования. Пуансон и матрица могут быть твердыми, эластичными, жидкостными, газообразными или в виде электромагнитного поля.

Степень локализации очага деформации зависит от размерных характеристик инструмента, в частности от зазора между пуансоном и матрицей, а также от радиусов закругления рабочих кромок этих инструментов. Чем меньше зазор и радиусы закругления рабочих кромок, тем больше локализуется очаг деформации в заготовке.

Для разделительных операций рабочие кромки должны быть острыми, а зазор между пуансоном и матрицей должен составлять десятые или даже сотые доли от толщины заготовки. Для формоизменяющих операций радиусы закруглений кромок инструментов значительно превышают толщину заготовки, а зазоры обычно несколько больше ее толщины.

Для осуществления листовой штамповки применяют следующее оборудование: ножницы (гильотинные, дисковые, вибрационные и др.), прессы (кривошипные, гидравлические), листоштамповочный молот и установки для выполнения специальных способов штамповки (ротационной вытяжки, штамповки взрывом, электромагнитной, электрогидравлической штамповки и др.). Процессы листовой штамповки состоят из выполняемых в определенной последовательности разделительных и формоизменяющих операций, посредством которых исходным заготовкам придают требуемую форму и размеры.

Разделительные операции (резка, вырубка, пробивка) сопровождаются разрушением заготовки по определенным поверхностям.

Резка – это отделение части заготовки по незамкнутому контуру на ножницах или в штампах. Обычно ее применяют как заготовительную операцию для разделения листов на полосы и заготовки нужных размеров для последующей штамповки.

Качество поверхности среза обеспечивает необходимый зазор между режущими кромками, который составляет $Z = (0,03-0,05)S$, где S – толщина листа.

Вырубка и *пробивка* предполагают отделение заготовки по замкнутому контуру в штампе. Вырубным пуансоном оформляют наружный контур изделия, а пробивным – внутренний контур (отверстие). При вырубке отделенная часть является изделием, а при пробивке – отходом. Характер деформирования заготовки при вырубке и пробивке одинаков. При определенной глубине внедрения режущих кромок (тем больше, чем выше пластичность металла) в заготовке возникают трещины, наклоненные к оси инструмента под углом от 4 до 6°. Вблизи поверхности среза образуется зона наклепанного металла. Это затрудняет последующую штамповку вырубленных заготовок. Для повышения качества поверхности и перпендикулярности среза применяют чистовую вырубку, сущность которой заключается в создании всестороннего сжатия в зоне очага пластической деформации. При вырубке со сжатием зазор между пуансоном и матрицей устанавливают от 0,005 до 0,01 мм, т. е. существенно меньшим, чем при обычной разделительной операции. Вырубка со сжатием может совмещаться с пробивкой отверстий и в ряде случаев сокращает объем механической обработки резанием при изготовлении деталей. Чистовой вырубкой изготавливают плоские кулачки, зубчатые колеса, пластины постоянных магнитов и т. п.

Формоизменяющие операции (гибка, вытяжка, отбортовка, обжим, раздача, формовка) выполняются пластической деформацией металла без разрушения заготовки (рис. 6.54).

Гибка, т. е. изменение кривизны средней поверхности при почти неизменных ее линейных размерах, сопровождается неравномерным распределением деформации по толщине (рис. 6.54, а). При гибке пластически деформируется только участок заготовки в зоне контакта с пуансоном: наружные слои растягиваются, а внутренние (обращенные к пуансону) сжимаются. Виды изделий, получаемых вытяжкой, представлены на рис. 6.55.

Вытяжка – операция, с помощью которой из плоской заготовки получают полые пространственные изделия (рис. 6.54, б). Под воздействием пуансона плоская заготовка диаметром $D_{\text{заг}}$ втягивается в отверстие матрицы и принимает форму полой детали диаметром d . Формоизменение заготовки при вытяжке оценивается степенью вытяжки $K = D_{\text{заг}}/d$, значение которой в зависимости от механических свойств материала и условий вытяжки не должна превышать от 1,8 до 2,1 за один переход. На рис. 6.56 показаны детали, получаемые вытяжкой.

Изделия с большим формоизменением заготовки получают за несколько операций вытяжки с постепенным уменьшением диаметра полой заготовки и увеличением ее высоты (рис. 6.54, в). Промежуточный отжиг для устранения наклепа позволяет увеличить степень вытяжки до 1,6.

Опасность разрушения заготовок устраняют также закруглением кромок пуансонов и матриц радиусом $r = (5-10)S$, где S – толщина листа, и применением смазок для уменьшения сил трения между поверхностями заготовок и инструмента.

Отбортовка – операция получения борта (горловины) в плоской или пространственной заготовке путем вдавливания в отверстие матрицы части заготовки с предварительно пробитым отверстием (рис. 6.54, г). Допустимое без разрушения формоизменение характеризуют коэффициентом отбортовки.

Обжим – операция, предназначенная для уменьшения поперечных размеров краевой части полой цилиндрической заготовки путем заталкивания ее в сужающую полость матрицы (рис. 6.54, д). Допустимое формоизменение при обжиге ограничивается не разрушением заготовки, а потерей ее устойчивости в процессе деформирования. Основным видом потери устойчивости является образование складок. При этом возможно образование кольцевой складки в цилиндрической недеформированной части заготовки или продольных складок в очаге деформации. Обычно за один переход можно получить изделие с диаметром краевого участка $d = (0,7-0,8)D_{\text{заг}}$. Складки обычно устраняют подпором стенок заготовки.

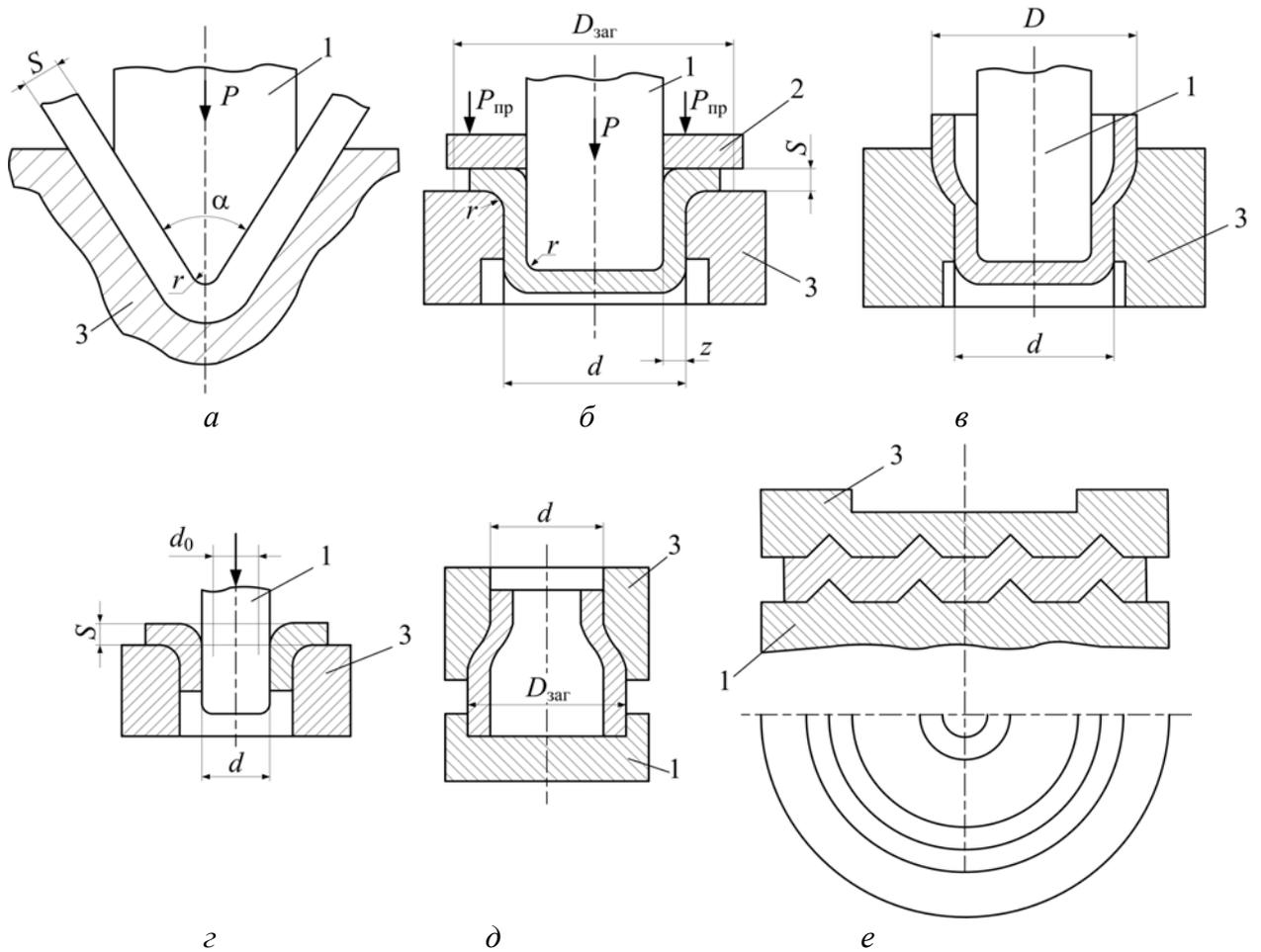


Рис. 6.54. Формоизменяющие операции листовой штамповки: а – гибка; б, в – вытяжка; г – отбортовка; д – обжим; е – формовка; 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица

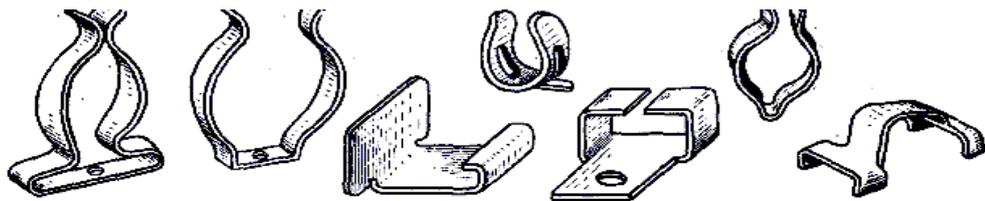


Рис. 6.55. Детали, получаемые гибкой

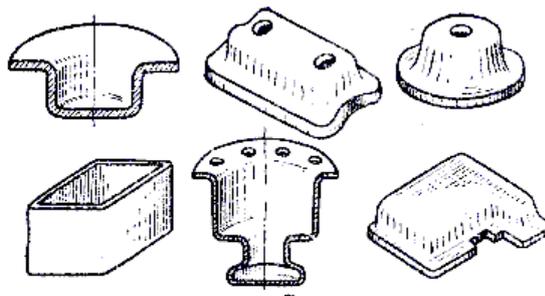


Рис. 6.56. Детали, получаемые вытяжкой

Формовка – операция получения местных углублений и выпуклостей в листовых и пространственных заготовках (рис. 6.54, е). При формовке очаг деформации охватывает часть заготовки, противостоящую полости матрицы. Схема напряженного состояния близка к схеме двухосного растяжения, и формообразование осуществляется за счет утонения заготовки. Высота получаемого углубления h ограничивается возможностью разрушения заготовки в местах наибольшего утонения и существенно зависит от механических характеристик деформируемого материала.

Допустимое значение h возрастает с увеличением толщины заготовки при прочих равных условиях. Максимальная глубина полости, образованной в условиях двухосного растяжения, может достигать величины $h = 3S$.

Формовку применяют для получения мембран с кольцевыми рифлениями, ребер жесткости в оболочках, а также для изготовления изделий сложной несимметричной формы.

При высокоскоростных способах штамповки скорость перемещения заготовки достигает 300–400 м/с. В этих условиях углеродистые и легированные конструкционные стали, а также пластичные сплавы цветных металлов значительно повышают пластичность, что увеличивает их допустимое формоизменение. Однако у труднодеформируемых сплавов повышение пластичности не наблюдается. Наиболее широкое применение в промышленности получили следующие способы высокоскоростного деформирования: штамповка взрывом, электрогидравлическая и электромагнитная штамповка.

6.7.3. Конструирование технологичных изделий, изготавливаемых листовой штамповкой

В зависимости от формы различают следующие виды изделий:

- плоские изделия, получаемые с помощью разделительных операций;
- изделия, изготавливаемые операцией гибки;
- полые оболочки, получаемые формоизменяющими (вытяжными) операциями;
- изделия сложной формы, изготавливаемые с помощью разделительных и формоизменяющих операций.

При проектировании этих изделий должны быть выполнены следующие требования:

- механические свойства материала исходной заготовки (листа, трубы) должны соответствовать требованиям прочности, жесткости изделий;
- коэффициенты формоизменения должны быть такими, чтобы оболочка могла быть изготовлена за один переход;
- размеры заготовок должны быть заданы с учетом возможностей имеющегося оборудования;
- при конструировании деталей следует предусматривать максимальное использование материала;

- целесообразно, чтобы форма детали была симметричной относительно одной или нескольких осей;
- унификация и стандартизация элементов конструкции детали должны обеспечивать сокращение номенклатуры технологической оснастки и многократное использование ее компонентов;
- необходимо унифицировать и уменьшить ассортимент применяемых толщин и марок материала заготовок (листов, труб) с целью снижения себестоимости изготовления деталей.

Технологичность конструкций плоских изделий определяется особенностями процесса разделения и механическими свойствами исходной заготовки. Требования к материалу заключаются в том, чтобы при выполнении этих операций получать высокую точность размеров изделий и качество поверхностей резания по толщине. Например, при прямолинейной отрезке на ножницах ширина получаемой полосы не должна быть менее двух толщин. В противном случае поперечное сечение полосы будет значительно деформировано.

Для технологичности полых оболочек, получаемых формоизменяющими операциями, при конструировании детали следует избегать неоправданного усложнения ее формы. К наиболее простым для изготовления относятся цилиндрические оболочки, а более сложными являются ступенчатые в виде тел вращения и коробчатые.

Особенности деформирования заготовок при вытяжке обуславливают определенные требования к правильному выбору радиусов сопряжения дна, стенок и фланцев, а также соотношений размеров поперечных сечений и высоты детали.

При конструировании оболочек, изготавливаемых формовкой, необходимо учитывать возможность разрушения заготовки в процессе деформирования.

Высота углубления существенно зависит от отношения толщины заготовки к ее поперечным размерам. Для исключения операции обрезки после формовки крупных элементов предпочтительно исходный контур заготовки задать концентрично контуру формуемого элемента. Шероховатость поверхности образованных ребер ухудшается по сравнению с параметрами листовой заготовки.

Использование трубных заготовок вместо листовых во многих случаях позволяет снизить расход материала и трудоемкость их изготовления. Так, одна операция обжима может заменить три-четыре операции вытяжки. Коэффициент использования материала повышается с 0,6–0,7 при использовании листовой заготовки до 0,9–0,95 при штамповке трубной заготовки.

ГЛАВА 7. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ ЗАГОТОВОК

Сваркой называют технологический процесс получения неразъемных соединений заготовок посредством установления межатомных связей между свариваемыми заготовками. Сварочные процессы применяют для изготовления сварных конструкций, исправления брака литья и восстановления поломанных и изношенных деталей.

Существенным преимуществом сварки является плотность швов, обеспечивающая герметичность резервуаров, котлов, вагонов-цистерн, трубопроводов, корпусов судов. Сварка позволяет соединять элементы, имеющие различную толщину, и упрощать технологию изготовления сложных узлов и конструкций. Возможность механизации и автоматизации производственных процессов, высокое качество сварных соединений и рациональное использование металла сделали сварку прогрессивным высокопроизводительным и экономически выгодным технологическим процессом.

Сущность процесса сварки заключается в возникновении атомно-молекулярных связей между контактирующими поверхностями. Для этого необходимо поверхности сблизить на расстояние, соизмеримое с атомным радиусом. В реальных условиях сближению поверхностей препятствуют микронеровности, окисные и органические пленки, адсорбированные газы.

Для получения качественного соединения необходимо устранить причины, препятствующие сближению контактирующих поверхностей, и сообщить атомам твердого тела некоторую энергию для повышения энергии поверхностных атомов, которая называется *энергией активации*. Эта энергия может сообщаться в виде теплоты (термическая активация) и в виде упругопластической деформации (механическая активация).

В зависимости от метода активации образование связей между атомами соединяемых поверхностей происходит в твердой или жидкой фазах. В соответствии с этим все способы сварки можно разделить на две основные группы: сварка пластическим деформированием (давлением) и сварка плавлением.

При сварке давлением сближение атомов и активация поверхности соединяемых материалов достигаются в результате совместной упругопластической деформации. В процессе пластической деформации в поверхностных контактирующих слоях выравниваются микронеровности, разрушается адсорбированный слой и увеличивается число активных центров взаимодействия. В результате атомы активизированных поверхностей вступают во взаимодействие и между ними образуется металлическая связь.

Методы сварки давлением разделяются на две подгруппы – термомеханические и механические.

Сварку давлением можно проводить:

- без предварительного нагрева места соединения (холодная, взрывом, ультразвуковая, трением), когда применяется только механическая энергия;

- с предварительным нагревом (контактная, диффузионная, газопрессовая), когда наряду с механической, применяется и тепловая энергия от внешних или внутренних источников теплоты.

Предварительный нагрев до пластического состояния или до оплавления применяют для металлов и сплавов, обладающих повышенным сопротивлением пластическим деформациям в холодном состоянии, что затрудняет их совместное деформирование, так как требует больших давлений на единицу поверхности.

Нагрев металла при сварке давлением осуществляется либо за счет дополнительных энергетических затрат (пропускание тока, сжигание газов, индуктирование в деталях токов высокой частоты), либо за счет частичного преобразования сообщаемой энергии в тепловую.

При сварке плавлением детали соединяют за счет местного расплавления металла свариваемых элементов без приложения давления. Расплавляется либо только основной металл (изделия) по кромкам, либо основной и дополнительный металл – электродный или присадочный.

Расплавленный металл образует общую сварочную ванну. При этом достигается разрушение окисных пленок, покрывающих поверхность соединяемых элементов, и сближение атомов до расстояния, при котором возникают металлические связи. После кристаллизации металла образуется сварочный шов, имеющий литую структуру.

Для расплавления основного и присадочного (или электродного) металлов применяют источники теплоты с температурой не ниже 3000 °С. В зависимости от характера источника теплоты различают электрическую и химическую сварку плавлением.

При электрической сварке плавлением источником теплоты служит электрический ток. Существуют следующие виды электрической сварки плавлением:

дуговая, при которой нагрев и плавление осуществляют за счет энергии, выделяемой дуговым разрядом;

электрошлаковая, при которой нагрев и плавление металла осуществляются за счет термической энергии, выделяемой током, проходящим через расплавленный флюс (шлаковую ванну);

электронно-лучевая, при которой энергия, расходуемая на нагрев и плавление металла в месте соединения, получается за счет интенсивной бомбардировки быстро движущимися в вакууме электронами;

плазменная, при которой источником теплоты является струя ионизированного газа;

лазерная, сварка лучом оптического квантового генератора (лазера), при которой нагрев и плавление металла осуществляются мощным световым лучом.

К сварке плавлением относится газовая, химическая сварка, где в качестве источника теплоты используют экзотермическую реакцию горения газов.

Свариваемость – свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия. Понятие свариваемости часто применяют при сравнительной оценке существующих и разработке новых материалов.

Свариваемость материалов оценивают степенью соответствия заданных свойств сварного соединения одноименным свойствам основного металла и их склонностью к образованию таких сварочных дефектов, как трещины, поры, шлаковые включения и др. По этим признакам материалы разделяют на хорошо, удовлетворительно и плохо сваривающиеся. Многие разнородные материалы, особенно металлы с неметаллами, не вступают во взаимодействие друг с другом. Такие материалы относятся к числу практически несваривающихся.

Свариваемость материалов в основном определяется типом и свойствами структуры, возникающей в сварном соединении при сварке. При сварке однородных металлов и сплавов в месте соединения, как правило, образуется структура, идентичная или близкая структуре соединяемых заготовок. Этому случаю соответствует хорошая свариваемость материалов.

При сварке разнородных материалов в зависимости от различия их физико-химических свойств в месте соединения образуется твердый раствор с решеткой одного из материалов либо химическое или интерметаллидное соединение с решеткой, отличающейся от решеток исходных материалов. Механические и физические свойства твердых растворов, особенно химических или интерметаллидных соединений, могут значительно отличаться от свойств соединяемых материалов. Такие материалы относятся к удовлетворительно сваривающимся.

Если образуются хрупкие и твердые структурные составляющие в сварном соединении, то в условиях действия сварочных напряжений возможно возникновение трещин в шве или околошовной зоне. В последнем случае материалы относятся к категории плохо сваривающихся.

Свариваемость, с одной стороны, зависит от материала, технологии сварки, конструктивного оформления соединения, а с другой – от эксплуатационных свойств сварной конструкции, которые определяются предъявляемыми к ним техническими требованиями. Это может быть одно свойство или комплекс свойств, в зависимости от назначения конструкции. Если эксплуатационные требования удовлетворяются, то свариваемость материалов считается достаточной. Если не обеспечивается хотя бы одно из этих свойств, то свариваемость материала считается недостаточной.

Для исследования свариваемости, как правило, применяют сварные образцы специальной конструкции или образцы с имитацией сварочных циклов. В результате испытания сварных образцов определяются условия появления дефектов, механические и специальные свойства соединений. Наряду с экспериментальными используют расчетные методы определения показателей свариваемости, учитывающие химический состав, тип соединения, вид, режим сварки и другие факторы.

В каждом конкретном случае основные показатели выбирают с учетом того, какие свойства и характеристики связаны с наиболее частыми отказами сварных соединений при эксплуатации.

При сварке однородных металлов в месте соединения, как правило, образуется структура, близкая к структуре соединяемых заготовок. В этом случае свариваемость оценивается как хорошая или удовлетворительная. В процессе сварки разнородных материалов в зависимости от степени их взаимной растворимости в соединении могут образовываться твердые растворы, химические и интерметаллические соединения. Механические и физические свойства соединений могут существенно отличаться от свойств свариваемых материалов. При этом высока вероятность образования несплошностей в виде трещин и несплавлений. Свариваемость в этом случае оценивается как ограниченная или плохая.

Прочность и твердость шва при сварке сплавов, как правило, ниже, чем у основного материала. Это объясняется тем, что для предотвращения образования трещин при сварке плавлением применяют менее легированный присадочный материал, чем металл заготовок. Пониженная пластичность шва может быть обусловлена крупнокристаллитной литой макроструктурой и повышенным содержанием газов.

В зоне термического влияния (ЗТВ), т. е. на участке основного металла, прилегающего к шву, под воздействием нагрева происходят фазовые и структурные превращения. В результате фазовых превращений в ЗТВ возможно существенное повышение твердости и снижение пластичности (рис. 7.1).

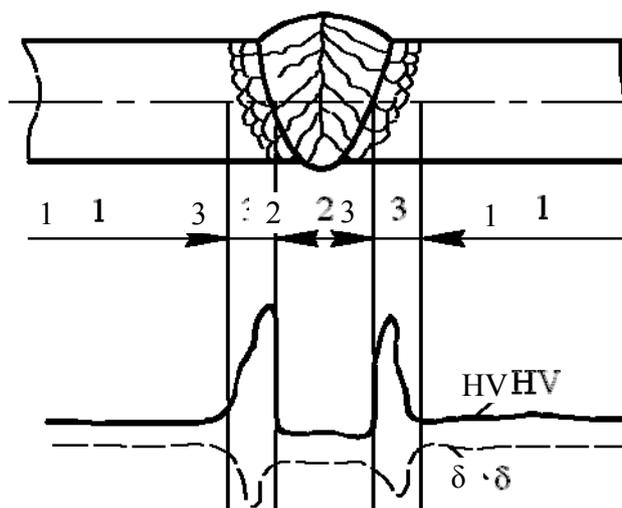


Рис. 7.1. Неоднородность механических свойств различных зон сварного соединения легированной стали: 1 – основной металл; 2 – шов; 3 – зона термического влияния

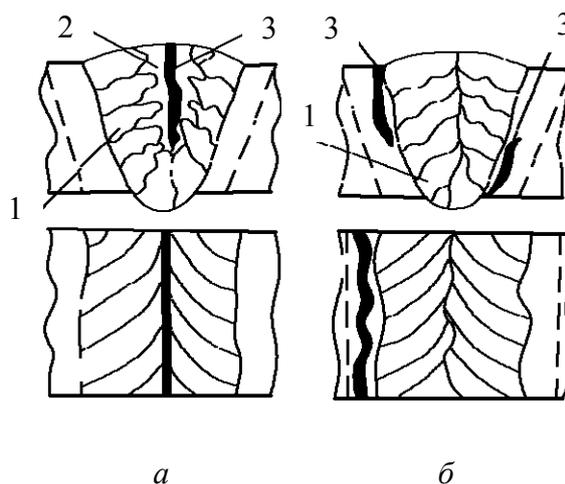


Рис. 7.2. Вид трещин сварных соединений: *а* – горячих; *б* – холодных; *1* – столбчатые кристаллы; *2* – расположение жидких прослоек при завершении кристаллизации шва; *3* – трещины

Наиболее опасным проявлением пониженной свариваемости является образование горячих и холодных трещин в шве и в ЗТВ (рис. 7. 2). Причины возникновения трещин – снижение пластичности и прочности как в процессе кристаллизации шва, так и в послесварочный период вследствие полиморфных превращений и насыщения газами, а также в результате развития сварочных напряжений и деформаций.

7.1. Технологические особенности получения сварных соединений из основных конструкционных материалов

Низкоуглеродистые (менее 0,3 % С) и некоторые низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью и соединяются большинством видов сварки без особых трудностей.

Углеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,3 % и более (сталь 45, 30ХГСА, 40ХНМА и др.), как правило, претерпевают закалку в ЗТВ. Поэтому для сварных соединений этих сталей характерна склонность к образованию в этой зоне холодных трещин, которые появляются при насыщении металла водородом.

Для обеспечения хорошей свариваемости этих сталей при дуговой сварке рекомендуют предварительный, сопутствующий и последующий прогрев заготовок до температур 100–300 °С, а также прокалку флюсов, электродов и осушение защитных газов. Контактную сварку этих сталей выполняют на режимах, обеспечивающих подогрев заготовок и замедленное охлаждение после сварки.

Сварка высоколегированных коррозионно-стойких сталей на режимах, обуславливающих продолжительное пребывание металла в области температур от 500 до 800 °С, может привести к потере коррозионной стойкости металлов шва и ЗТВ. При дуговой сварке для предупреждения межкристал-

литной коррозии соединений рекомендуется технологический процесс с использованием минимально необходимой тепловой энергии, затрачиваемой на образование единицы длины шва и с применением теплоотводящих подкладок, уменьшающих время пребывания металла при высоких температурах.

Сварка меди и ее сплавов. На свариваемость меди большое влияние оказывают содержащиеся в ней вредные примеси, к которым относятся кислород, водород, фосфор. Кислород, находящийся в меди в виде оксида, является одной из причин образования горячих трещин в сварных швах.

В расплавленной меди водород имеет высокую растворимость, которая резко снижается при кристаллизации. Водород, оставшийся в твердом металле, вступает в реакцию с оксидом меди, в результате чего выделяются водяные пары. Последние скапливаются под высоким давлением в микропустотах, что приводит к так называемой *водородной хрупкости*.

Поскольку медь обладает высокой теплопроводностью, дуговую сварку выполняют с высокой погонной энергией и с предварительным подогревом. Для предотвращения образования трещин сварку осуществляют в атмосфере аргона, гелия, азота и их смесей либо под флюсом на основе буры. Медные заготовки толщиной более 50 мм соединяют электрошлаковой сваркой.

Основной трудностью при сварке латуни является испарение цинка. В результате снижаются прочность и коррозионная стойкость швов. При дуговой сварке в защитных газах преимущественно применяют неплавящийся (вольфрамовый) электрод. Для сварки заготовок из бронзы применяют ту же технологию, что и при сварке меди.

Латуни и бронзы имеют более высокое удельное электросопротивление, чем медь, поэтому они достаточно хорошо свариваются контактной сваркой. Медные заготовки контактной сваркой не соединяются.

Сварка алюминия и его сплавов. Трудности сварки заготовок из этих металлов обусловлены образованием на поверхности кромок прочной и тугоплавкой пленки оксида алюминия, а также склонностью к образованию газовой пористости и горячих трещин.

Термически упрочняемые сплавы системы Al–Cu–Mg (дуралюмины) обладают плохой свариваемостью. При нагреве свыше 500 °С в этих сплавах оплавляются границы зерен с образованием эвтектических включений, в результате чего происходит охрупчивание сварного соединения в ЗТВ и снижение прочности по сравнению с основным материалом.

При изготовлении конструкций из алюминия и его сплавов наиболее широко применяют дуговую сварку в атмосфере инертных газов. Заготовки из этих металлов также соединяют электрошлаковой и контактной сваркой. Чистый алюминий обладает хорошей свариваемостью в условиях холодной сварки.

Сварка тугоплавких металлов и сплавов. Трудности при сварке титана, циркония и молибдена связаны с тем, что они при нагреве интенсивно поглощают кислород, водород и азот. При этом даже незначительное

содержание этих газов приводит к резкому снижению пластических свойств металлов.

Титан и его сплавы соединяют дуговой сваркой в атмосфере аргона высшего сорта. Для сварки заготовок из этих сплавов также применяют плазменную и электронно-лучевую сварки.

7.2. Сварка плавлением и резка металлов

7.2.1. Электродуговая сварка

Электродуговая сварка – это сварка плавлением. Источником теплоты, необходимой для расплавления кромок соединяемых изделий, является электрическая дуга, которая горит между двумя электродами (одним из которых является заготовка).

Электрическая дуга является мощным стабильным электрическим разрядом в ионизированной газовой среде. При низкой температуре газ не проводит электрический ток. Газ может проводить электрический ток лишь в том случае, если его молекулы разделяются на положительные и отрицательные частицы – ионы (ионизируются). Ионизация газа происходит при высокой температуре под действием электрического поля.

На [рис. 7.3](#) схематически показан процесс зажигания дуги при сварке. Он состоит из трех этапов:

- короткое замыкание электрода (катода) на заготовку (анод);
- отвод электрода на расстояние 3–6 мм;
- возникновение устойчивого дугового разряда.

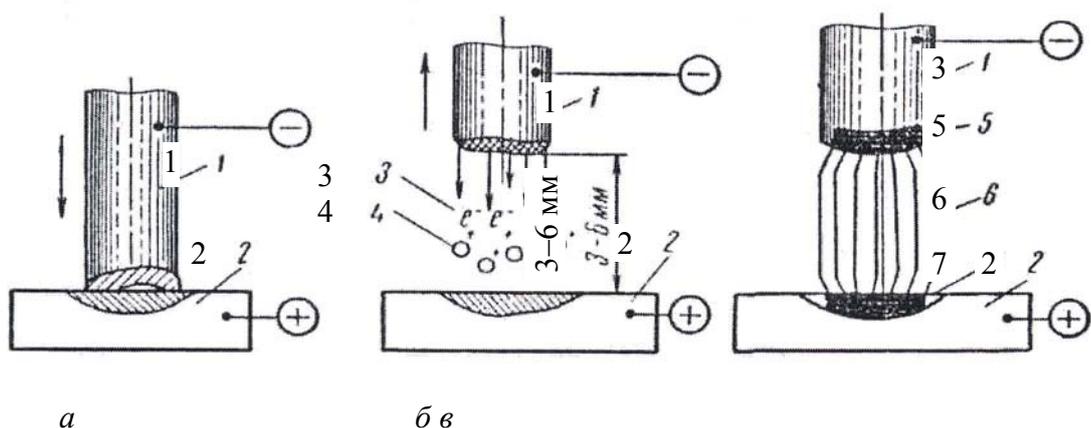


Рис. 7.3. Зажигание электрической дуги: *а* – короткое замыкание; *б, в* – этапы формирования стабильной дуги

Короткое замыкание ([рис. 7.3, а](#)) производится с целью разогрева электрода и основного металла в зоне их контакта. После отвода электрода ([рис. 7.3, б](#)) с его разогретого торца под действием электрического поля происходит эмиссия электронов.

Ионизация газа при соударениях его молекул с электронами, которые вырываются с поверхности катода, возрастает с увеличением силы тока (так как увеличивается кинетическая энергия электронов).

В результате ионизации электропроводность дугового промежутка соответствует электропроводности металлов и обеспечивает поддержание устойчивого разряда при прохождении тока. Процесс зажигания дуги заканчивается образованием стабильного электрического разряда (рис. 7.3, в). Основаниями столба дуги служат резко ограниченные области на поверхности электродов – электродные пятна (катодное и анодное).

В дуге происходит взаимная бомбардировка катода положительными ионами и анода электронами, в результате чего кинетическая энергия частиц переходит в тепловую. Происходит нагрев, способствующий расплавлению электрода и основного металла. При сварке заготовку принято называть *основным металлом*.

Электрическая дуга является концентрированным источником тепла с очень высокой температурой. Температура столба дуги достигает 6000 °С, а температура анодного и катодного пятна на металле находится в пределах 2000–3000 °С.

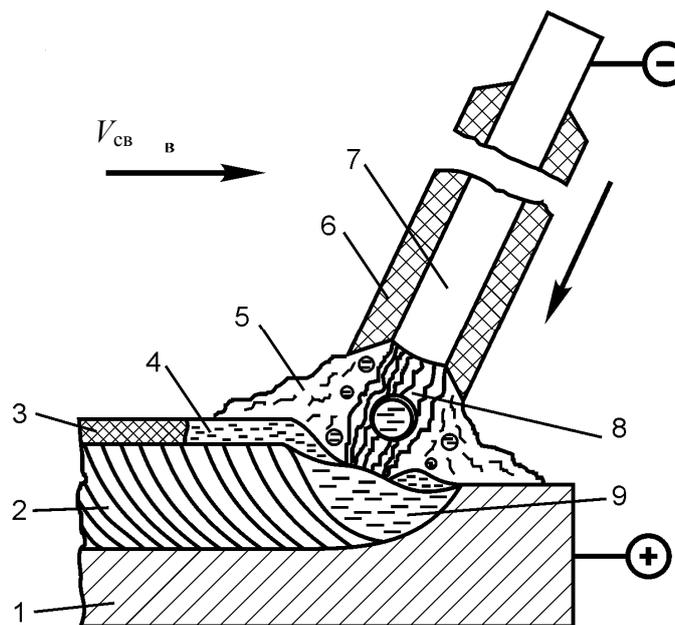


Рис. 7.4. Схема дуговой электросварки металлическим покрытым электродом: 1 – свариваемый металл; 2 – сварной шов (наплавленный металл); 3 – твердая шлаковая корка; 4 – жидкая шлаковая ванна; 5 – газовая защитная атмосфера; 6 – покрытие электрода; 7 – металлический стержень из сварочной проволоки; 8 – электрическая дуга; 9 – металлическая ванна

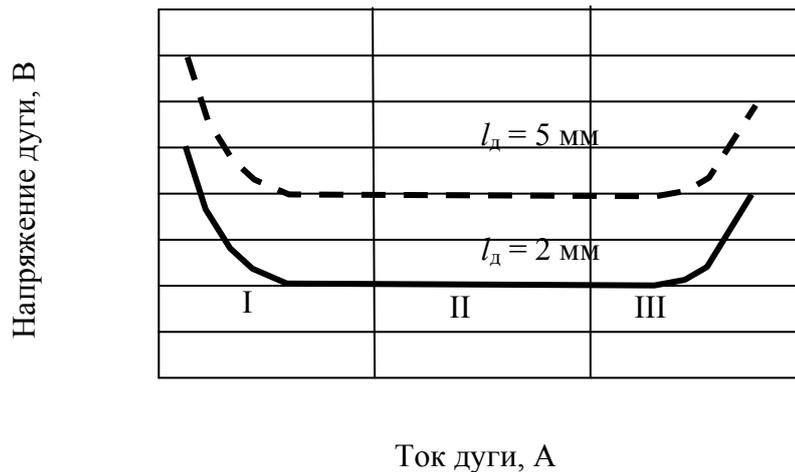


Рис. 7.5. Вольт-амперная характеристика сварочной дуги в зависимости от ее длины

При ручной электродуговой сварке электрод после зажигания дуги перемещают вдоль кромок свариваемых изделий вручную (рис. 7.4). Дуга горит между стержнем электрода 7 и металлом 1, расплавленный металл стержня электрода каплями стекает в металлическую ванну 9. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода 6. Состав покрытия подбирается так, чтобы вокруг дуги создавалась газовая среда 5 (защищает дугу от воздуха и стабилизирует ее горение за счет ионизации) и образовывался жидкий шлак 4 (защищает металл от окисления и насыщения азотом). По мере перемещения дуги вдоль заготовок сварочная ванна затвердевает и образует сварной шов 2. Шлак замедляет охлаждение металла, способствует уплотнению шва. Застывший шлак образует твердую корку 3.

Электрические свойства дуги описываются вольт-амперной характеристикой, представляющей собой зависимость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 7.5). Характеристика состоит из трех участков: I – падающая; II – жесткая; III – возрастающая. Широко применяется дуга с жесткой и возрастающей характеристиками. Дуга с падающей характеристикой малоустойчива и имеет ограниченное применение.

Для дуги с жесткой характеристикой напряжение

$$U_d = \alpha + \beta I_d,$$

где α, β – опытные коэффициенты.

Из приведенной на рис. 7.5 зависимости следует, что для сохранения напряжения дуги постоянным длина дуги не должна изменяться.

7.2.2. Источники сварочного тока

Источники сварочного тока должны обладать хорошими динамическими свойствами, т. е. мгновенно реагировать на изменения вольт-амперной

характеристики сварочной дуги, что отличает их от источников тока, питающих силовую и осветительную (бытовую) сети, которые должны обеспечивать постоянное напряжение независимо от нагрузки (величины тока, идущего потребителям). Их внешняя вольт-амперная характеристика близка к прямой, параллельной абсциссе и называется *жесткой* (линия А на [рис. 7.6](#)).

Внешней характеристикой источника тока называется зависимость напряжения на его выходных клеммах от тока в сварочной цепи.

Обмотку сварочных генераторов и трансформаторов необходимо предохранить от разрушения токами короткого замыкания при возбуждении дуги. Поэтому внешняя вольт-амперная характеристика источников сварочного тока должна быть падающей (кривая Б на [рис. 7.6](#)). Напряжение при их работе уменьшается с увеличением тока, а при токе короткого замыкания оно падает до нуля.

Напряжение холостого хода обычно 60–80 В, что достаточно для зажигания дуги и относительно безопасно для работы сварщика. Точка 1 на [рис. 7.6](#) соответствует режиму холостого хода в работе источника тока, т. е. в период, когда дуга не горит и сварочная цепь разомкнута. Точка 3 соответствует режиму короткого замыкания при зажигании дуги, когда напряжение стремится к нулю, а ток повышается. Величина тока ограничена, чтобы не допустить перегрева токопроводящих проводов и источников тока.

Режим устойчивого горения дуги определяется точкой 2 на [рис. 7.6](#) при пересечении вольт-амперных характеристик дуги (кривая В) и источника сварочного тока (кривая Б).

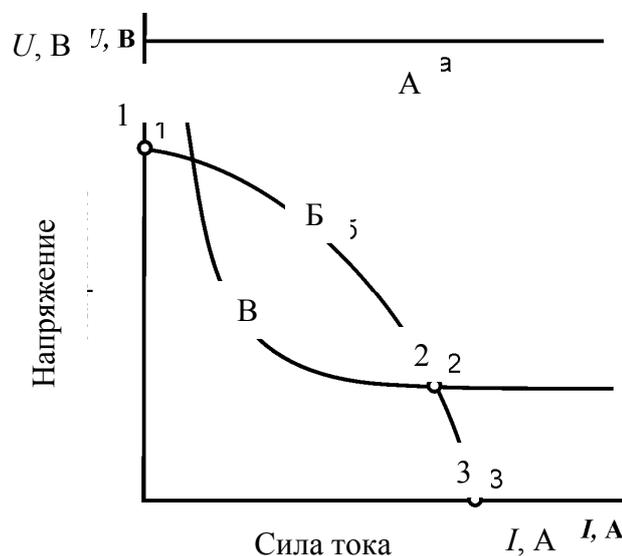


Рис. 7.6. Внешние характеристики источников питания и электростатическая характеристика дуги

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные генераторы, выпрямители). Источники переменного тока более распространены.

Сварочные трансформаторы проще и надежнее в эксплуатации, долговечнее, у них выше КПД.

Однако устойчивость дуги при использовании постоянного тока значительно выше, чем при применении переменного тока. При питании переменным током нормальной частоты (50 Гц) происходит синусоидальное изменение напряжения и тока; ток в секунду 100 раз меняет свое направление, дуга периодически гаснет и зажигается, а при наличии недостаточной ионизации между электродами может прерваться.

При постоянном токе повышается устойчивость горения дуги, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях, появляется возможность вести сварку на прямой и обратной полярностях. Последнее, вследствие более высокой температуры на аноде, позволяет проводить сварку электродами с тугоплавкими покрытиями и флюсами. Выбор источника питания дуги определяется конкретными условиями производства.

В современной сварочной технике применяют разные системы сварочных трансформаторов.

Трансформатор с отдельной дроссельной катушкой. Падающая вольт-амперная характеристика этого трансформатора (рис. 7.7, б, кривая 1) обеспечивается последовательным включением индуктивного сопротивления дросселя.

Понижающий трансформатор (рис. 7.7, а) состоит из магнитопровода 3 (сердечника), первичной 1 и вторичной 2 обмоток. Он снижает напряжение сети 220 или 380 В до напряжения холостого хода 60–80 В. Дроссель 5 предназначен для получения падающей внешней характеристики и регулирования величины сварочного тока. При прохождении переменного тока через обмотку дросселя 5, установленную на магнитопроводе 4 и представляющую собой катушку с большим индуктивным сопротивлением, в ней возбуждается ЭДС самоиндукции, направленная противоположно основному напряжению. Причем чем выше величина сварочного тока, тем больше падает напряжение на дросселе и уменьшается величина напряжения на дуге. Этим обеспечивают получение падающей внешней характеристики сварочного трансформатора (рис. 7.7, б).

Регулирование сварочного тока производится изменением воздушного зазора δ в дроссельной катушке с помощью рукоятки б. Увеличение зазора приводит к увеличению сварочного тока $I_{св2}$ и уменьшению кривизны падающей вольт-амперной характеристики источника питания сварочной дуги. Уменьшение зазора соответствует уменьшению сварочного тока $I_{св1}$ и увеличению кривизны вольт-амперной характеристики (рис. 7.7, б).

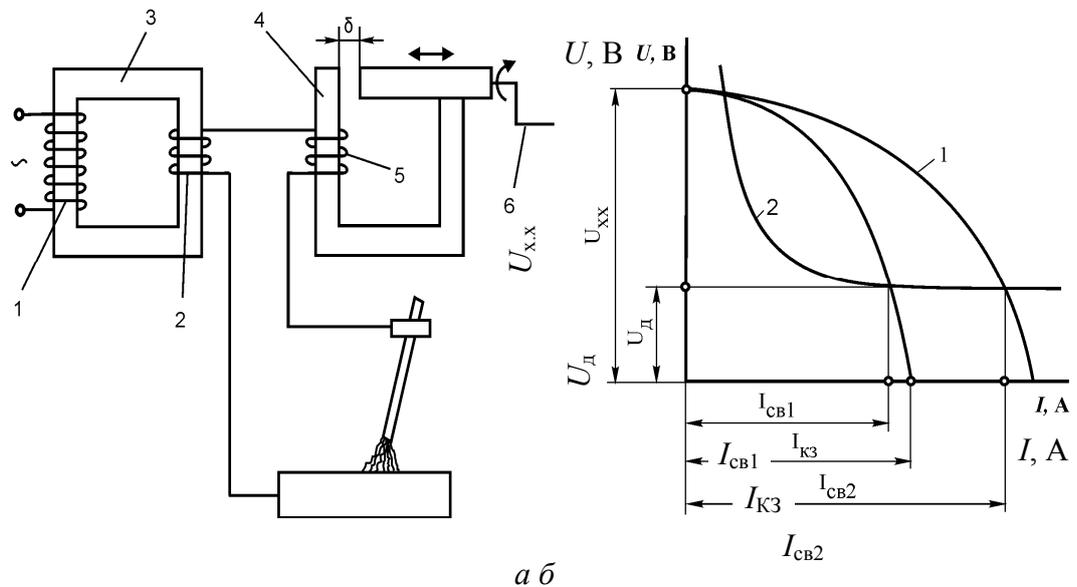


Рис. 7.7. Сварочный трансформатор с отдельной дроссельной катушкой:
 а – схема; б – внешние характеристики трансформатора (1) и сварочной дуги (2)

Устойчивость горения дуги достигается сдвигом во времени между нулевыми значениями напряжения и тока на обмотке дросселя. Плавное регулирование величины сварочного тока обеспечивают изменение воздушного зазора рукояткой *б* в сердечнике дросселя. С увеличением зазора индуктивное сопротивление дросселя уменьшается, а сварочный ток увеличивается от $I_{св1}$ до $I_{св2}$, при уменьшении зазора – наоборот (рис. 7.7, б).

Трансформатор с увеличенным магнитным рассеянием и подвижной вторичной обмоткой (рис. 7.8). При работе трансформатора основной магнитный поток Φ_0 , создаваемый первичной 1 и вторичной 2 обмотками, замыкается через магнитопровод 3. Часть магнитного потока ответвляется и замыкается вокруг обмоток через воздушное пространство, образуя потоки рассеяния Φ_{S1} и Φ_{S2} , которые индуцируют в обмотках ЭДС, противоположную основному напряжению. С увеличением сварочного тока увеличиваются потоки рассеяния и, следовательно, возрастает индуктивное сопротивление вторичной обмотки, что создает падающую внешнюю характеристику.

Для обеспечения плавного регулирования сварочного тока изменяют расстояние между обмотками трансформатора. При сближении обмоток (рис. 7.8, б) частично уничтожаются противоположно направленные потоки рассеяния Φ_{S1} и Φ_{S2} , что уменьшает индуктивное сопротивление вторичной обмотки и увеличивает сварочный ток. Минимальный сварочный ток соответствует наибольшему расстоянию между обмотками и максимальному потоку рассеяния.

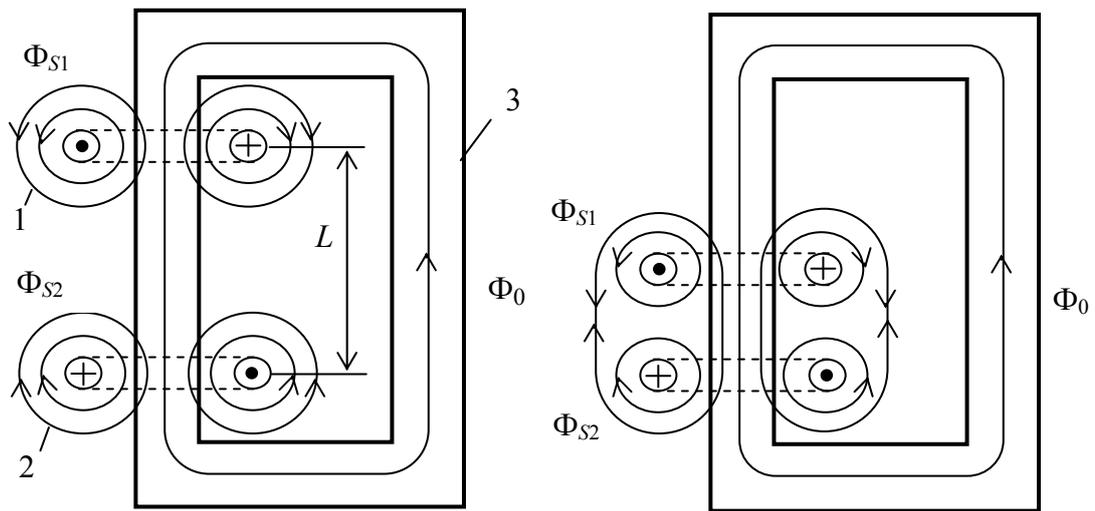


Рис. 7.8. Трансформатор с увеличенным магнитным рассеянием и подвижной вторичной обмоткой

Сварочные генераторы являются электрическими машинами постоянного тока и в зависимости от конструктивных особенностей могут иметь падающие, жесткие, пологопадающие и комбинированные внешние характеристики. Наиболее распространены генераторы с падающими внешними характеристиками, работающие по одной из следующих трех схем:

- с независимым возбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой;

- с намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмотками возбуждения;

- с расщепленными полюсами.

По технологическим, энергетическим и весовым показателям перечисленные генераторы примерно одинаковы.

Рассмотрим схему и принцип работы генератора с независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой (рис. 7.9). В генераторе имеются две обмотки возбуждения – независимая, создающая намагничивающий поток Φ_n и последовательная размагничивающая, создающая размагничивающий поток Φ_p . ЭДС генератора индуцируется магнитным потоком Φ_n .

При нагрузке (сварке) сварочный ток проходит через размагничивающую обмотку, включенную так, что ее магнитный поток Φ_p направлен против магнитного потока Φ_n обмотки независимого возбуждения. С увеличением тока в сварочной цепи возрастает размагничивающее действие последовательной обмотки Φ_p и напряжение генератора становится меньше, так как ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря генератора, зависит от общего магнитного потока Φ_0 генератора ($\Phi_0 = \Phi_n - \Phi_p$). Этим и обеспечивается падающая внешняя характеристика генератора.

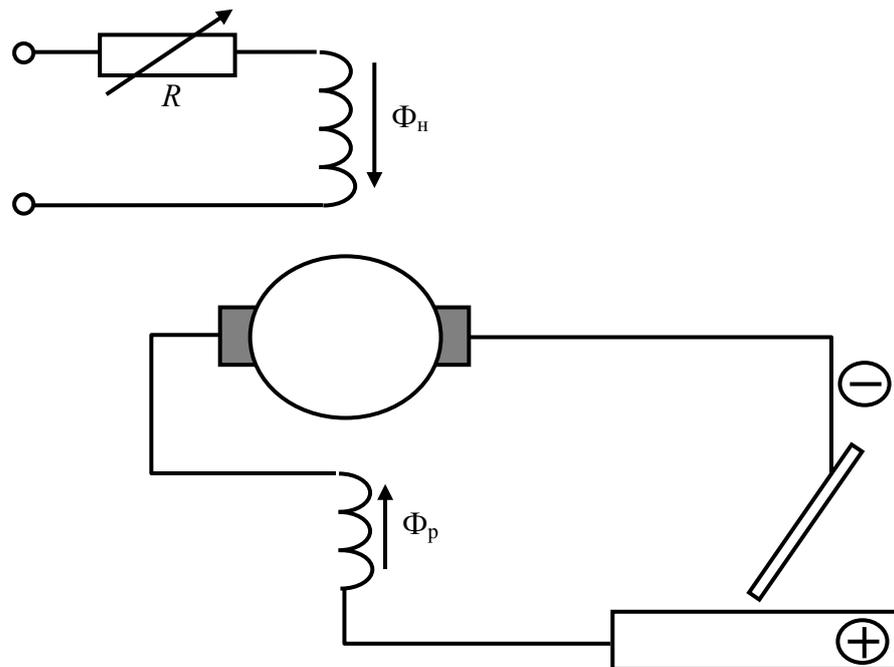


Рис. 7.9. Схема сварочного генератора с независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой

Плавное регулирование тока осуществляется реостатом R в цепи намагничивающей обмотки (рис. 7.9).

Сварочные выпрямители – устройства, преобразующие с помощью полупроводниковых элементов (вентилей) переменный ток в постоянный. Они предназначены для питания сварочной дуги и состоят (рис. 7.10) из трехфазного понижающего трансформатора 1 , блока селеновых или кремниевых выпрямителей 2 и дросселя 3 . Выпрямители соединены в трехфазную мостовую схему выпрямления, обеспечивающую постоянство выпрямленного напряжения.

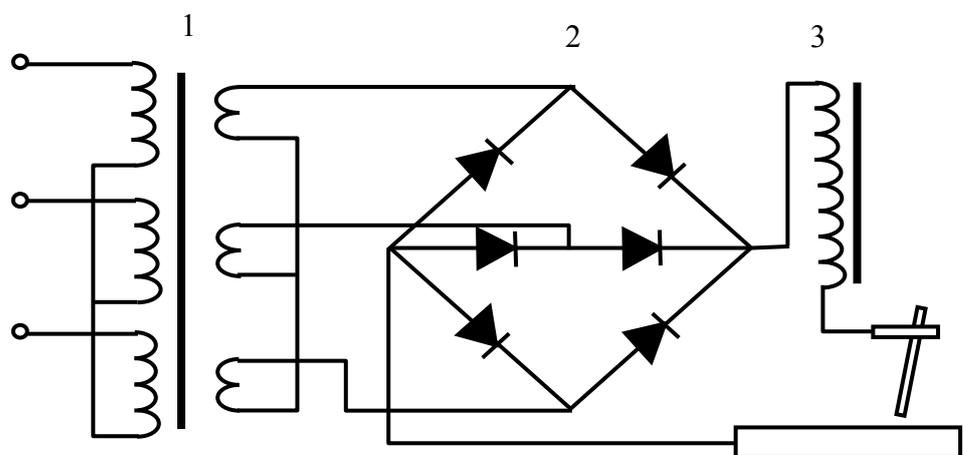


Рис. 7.10. Схема трехфазного выпрямителя

Дроссель предназначен для получения падающей внешней характеристики. По сравнению с генераторами выпрямители имеют ряд преимуществ: они обеспечивают высокую стабильность горения дуги (особенно на малых токах), имеют более высокие динамические характеристики (благодаря меньшей электромагнитной индукции), более высокий КПД, меньшие потери при холостом ходе и более высокие пределы регулирования сварочного тока, просты и надежны в эксплуатации (вследствие отсутствия вращающихся частей), при работе не создают шума.

7.2.3. Электроды для ручной электродуговой сварки

Плавящийся электрод представляет собой металлический стержень с нанесенным на его поверхность слоем специального покрытия (обмазки).

Длина металлического стального стержня в зависимости от его диаметра может составлять 250–450 мм.

Свойства электрода определяются химическим составом электродного стержня и покрытия. Химический состав электродной стальной проволоки, из которой изготавливают электродные стержни, выбирают в соответствии с химическим составом и свойствами металла свариваемого изделия по ГОСТ 2246–70.

В зависимости от химического состава проволоку разделяют на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную. Всего в ГОСТ включено 77 марок проволоки диаметром 0,3–12 мм. Обозначение марок электродной проволоки состоит из букв и цифр, например Св-08 или Св-30ХГСА. Первые две буквы «Св» указывают на назначение проволоки – сварочная, а следующие за буквами две цифры и буквы с цифрами аналогичны обозначениям, принятым для машиностроительных сталей.

По толщине покрытия электроды бывают с тонкими и толстыми покрытиями. Тонкие покрытия для ручной электродуговой сварки (РЭС) являются стабилизирующими, они состоят из мела и жидкого стекла. Находящийся в составе мела кальций выделяется в плазме дуги и ионизирует ее, тем самым способствует устойчивости горения дуги.

Средние и толстые покрытия обеспечивают устойчивость горения дуги, а также защиту и легирование металла. В их состав входят следующие компоненты:

стабилизирующие ионизируют газовый промежуток между электродами и повышают устойчивость горения дуги;

шлакообразующие образуют шлак, который защищает металл от доступа воздуха и удаляют примеси из жидкого металла;

газообразующие при горении образуют газ, который защищает дугу и расплавленный металл от доступа воздуха;

раскисляющие связывают кислород и удаляют его из сварного шва;

легирующие переходят в металл шва и обеспечивают требуемый его состав;

связующие скрепляют все компоненты покрытия на поверхности электрода.

Состав электродного покрытия устанавливают в соответствии с химическим составом металлов электродного стержня и изделия. Электроды для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей классифицируют по механическим характеристикам. Эта группа содержит 15 типов электродов – с Э38 по Э150. Здесь буква «Э» – электрод для дуговой сварки, а следующая за буквой цифра показывает минимально гарантируемый предел прочности металла шва (10^{-1} МПа). К одному типу электрода могут быть отнесены одна или несколько марок электродов.

Электроды для сварки легированных теплоустойчивых сталей классифицируют по механическим характеристикам металла шва и сварного соединения, а также по химическому составу металла шва.

Требования, предъявляемые к электродам для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами, учитывают: свойства наплавленного металла, химический состав, механические свойства, структуру и стойкость против межкристаллитной коррозии.

7.2.4. Автоматическая дуговая сварка

Сварка под флюсом. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом представлена на [рис. 7.11](#).

Для сварки под слоем флюса используют непокрытую электродную проволоку и флюс для защиты дуги и сварочной ванны от воздуха.

Механизированная
подача

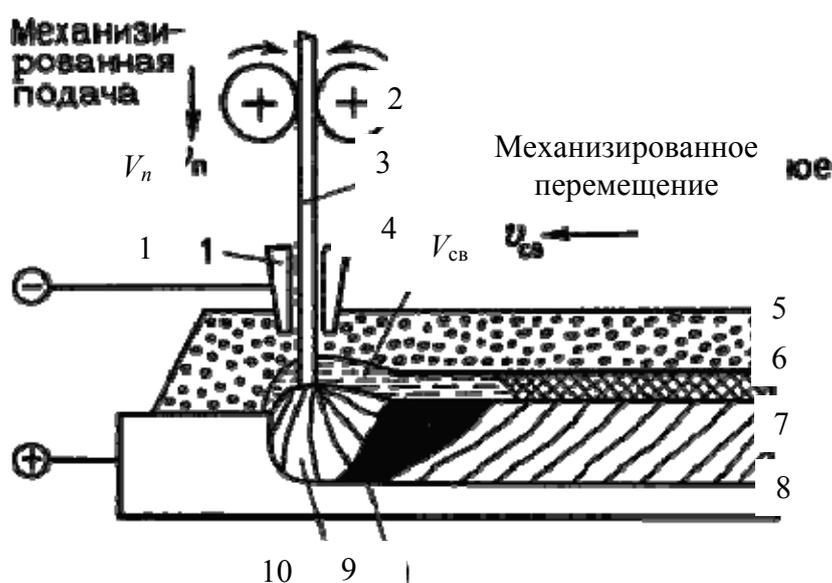


Рис. 7.11. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом

Подача и перемещение электродной проволоки механизированы. Автоматизированы процессы зажигания дуги и заварки кратера в конце шва. Дуга *10* горит между проволокой *3* и основным металлом *8*. Столб дуги и металлическая ванна жидкого металла *9* со всех сторон плотно закрыты слоем флюса *5* толщиной 30–50 мм. Часть флюса плавится, и образуется жидкий шлак *4*, защищающий жидкий металл от воздуха. Качество защиты лучше, чем при ручной дуговой сварке. По мере поступательного движения электрода металлическая и шлаковая ванны затвердевают с образованием сварного шва *7*, покрытого твердой шлаковой коркой *6*. Проволоку подают в дугу с помощью механизма подачи *2*. Ток к электроду подводят через токопровод *1*.

Для сварки под флюсом характерно глубокое проплавление основного металла. Преимущества автоматической сварки под флюсом по сравнению с ручной: повышение производительности процесса сварки в 5–20 раз, повышение качества сварных соединений и уменьшение себестоимости 1 м сварного шва.

Флюсы. Применяемые флюсы различают по назначению.

Флюсы для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей предназначены для раскисления шва и легирования его марганцем и кремнием. Для этого применяют высококремнистые марганцевые флюсы, которые получают путем сплавления марганцевой руды, кремнезема и плавикового шпата в электропечах.

Флюсы для сварки легированных и высоколегированных сталей должны обеспечивать минимальное окисление легирующих элементов в шве. Для этого применяют керамические низкокремнистые, бескремнистые и фторидные флюсы, которые изготавливают из порошкообразных компонентов путем их замеса на жидком стекле, гранулирования и последующего прокаливания. Основу керамических флюсов составляют мрамор, плавиковый шпат и хлориды щелочно-земельных металлов.

Электродуговая сварка в защитных газах. При такой сварке электрод, зона дуги и сварочная ванна защищены струей защитного газа: инертного (аргон, гелий) или активного (углекислый газ, азот, водород).

Сварку в инертных газах можно выполнять неплавящимся и плавящимся электродами ([рис. 7.12](#)). В качестве неплавящегося электрода применяется прутки вольфрама, а в качестве плавящегося – проволока из основного металла или близкого ему по химическому составу.

Область применения аргонодуговой сварки охватывает широкий круг материалов и изделий: узлы летательных аппаратов, элементы атомных установок, корпуса и трубопроводы химических аппаратов. Аргонодуговую сварку применяют для легированных и высоколегированных сталей, цветных (алюминий, магний, медь) и тугоплавких (титан, ниобий, ванадий, цирконий) металлов и их сплавов.

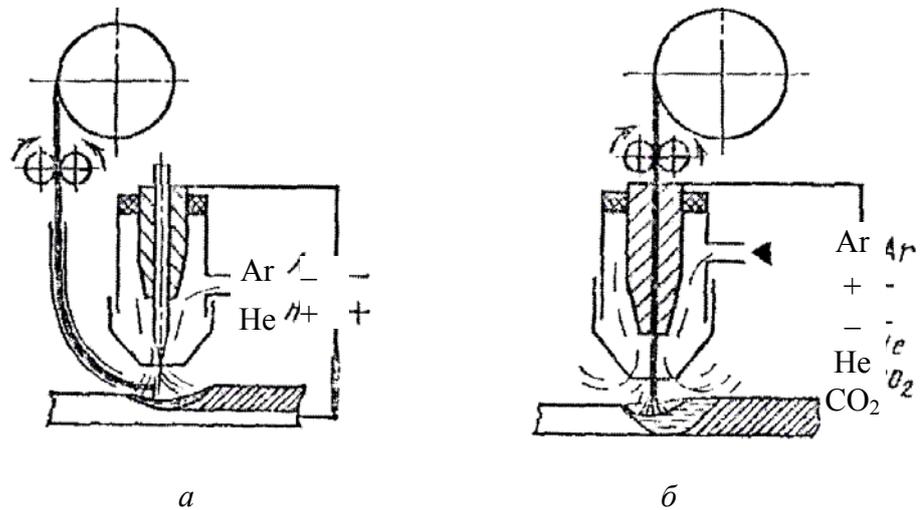


Рис. 7.12. Схема сварки в защитных газах: а – неплавящимся электродом; б – плавящимся электродом

Электродуговая сварка в углекислом газе выполняется только плавящимся электродом. Защита сварочной ванны осуществляется углекислым газом. Углекислый газ химически активен по отношению к жидкому металлу. При нагреве он диссоциирует на оксид углерода и кислород, который окисляет железо и легирующие элементы. Окисляющее действие кислорода нейтрализуется введением в проволоку дополнительного количества раскислителей. Для сварки углеродистых и низколегированных сталей применяют сварочную проволоку с повышенным содержанием кремния и марганца. Хорошее качество сварного шва получается при использовании специальной порошковой проволоки.

Обычно свариваются конструкции из углеродистых и низколегированных сталей (газо- и нефтепроводы, корпуса судов и т. п.). При сварке меди, алюминия, титана и редких металлов невозможно связать свободный кислород введением раскислителей.

Преимуществами данного способа являются низкая стоимость углекислого газа и высокая производительность. Основной недостаток – разбрызгивание металла (на зачистку расходуется 30–40 % времени сварки).

7.2.5. Плазменная сварка

Плазменная струя, применяемая для сварки, представляет собой направленный поток частиц ионизированного газа, имеющего температуру 10 000–20 000 °С. Плазму получают в плазменных горелках, пропуская газ через столб сжатой дуги. В качестве плазмообразующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси.

Применяют два основных плазменных источника нагрева: плазменную струю, выделенную из столба косвенной дуги, и плазменную дугу, в которой дуга прямого действия совмещена с плазменной струей.

Плазменная струя представляет собой независимый источник теплоты, позволяющий в широких пределах изменять степень нагрева и глубину проплавления поверхности заготовок. Тепловая мощность плазменной струи ограничена, и ее применяют для сварки и резки тонких металлических листов и неэлектропроводящих материалов, для напыления тугоплавких материалов.

Плазменная дуга обладает большой тепловой мощностью, имеет более широкое применение: для сварки высоколегированной стали, сплавов титана, никеля, молибдена, вольфрама. Плазменную дугу применяют для резки материалов (меди, алюминия), наплавки тугоплавких материалов на поверхность.

Плазменной дугой можно сваривать металл толщиной до 10 мм без разделки кромок и применения присадочного материала. Так как плазменная дуга обладает высокой стабильностью, то обеспечивается повышенное качество сварных швов. Это позволяет выполнять микроплазменную сварку металла толщиной 0,025–0,8 мм.

Недостаток плазменной сварки – недолговечность горелок.

7.2.6. Электрошлаковая сварка

Сущность процесса заключается в том, что тепловую энергию, необходимую для расплавления основного и присадочного металла, дает теплота, выделяемая в объеме шлаковой ванны при прохождении через нее тока (рис. 7.13).

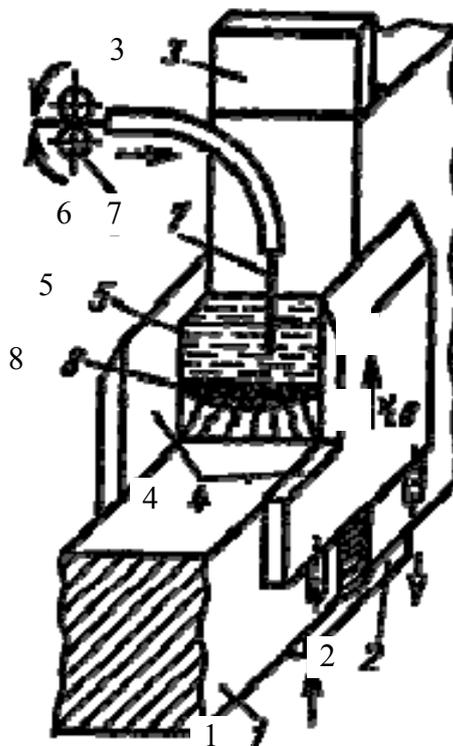


Рис. 7.13. Схема электрошлаковой сварки

Свариваемые заготовки 1 устанавливают в вертикальном положении. В замкнутое пространство между водоохлаждаемыми медными ползунами 4 и

вертикально установленными кромками изделий засыпают флюс и подают электродную проволоку 7 при помощи специального механизма подачи 6.

В начале процесса возбуждают дугу, флюс плавится и образуется электропроводный шлак 5. Шлак шунтирует дугу, она гаснет, выходная цепь источника питания замыкается через шлак. Ток, проходя через шлак, разогревает его, это приводит к расплавлению кромок основного металла и электрода. Расплав стекает вниз и образует сварочную ванну 8, выжимая шлак вверх, и затвердевает.

В начальном и конечном участках шва образуются дефекты: в начале шва – непровар кромок, в конце шва – усадочная раковина и неметаллические включения. Поэтому сварку начинают и заканчивают на специальных планках 2 и 3, которые затем удаляют газовой резкой.

Преимущества способа: возможна сварка металла любой толщины (начиная с 16 мм). Заготовки толщиной до 150 мм можно сваривать одним электродом, совершающим поперечное колебание в плоскости стыка. При толщине заготовки более 150 мм используют несколько проволок. Есть опыт сварки металла толщиной до 2 м.

Недостаток способа – образование крупного зерна в шве и околошовной зоне вследствие замедленного нагрева и охлаждения. Необходимо проведение термической обработки: нормализации или отжига для измельчения зерна.

Электрошлаковую сварку широко применяют в тяжелом машиностроении для изготовления ковано-сварных и литосварных конструкций: это станины и детали мощных прессов и станков, коленчатые валы судовых дизелей, роторы и валы гидротурбин, котлы высокого давления и т. п.

7.2.7. Лучевые способы сварки

Электронно-лучевая сварка. Сущность процесса состоит в том, что свариваемые детали, собранные без зазора, помещают в вакуумную камеру и подают на них электронный луч – пучок электронов, движущихся с большой скоростью. При соударении с изделием электроны тормозятся, их кинетическая энергия переходит в тепловую энергию и расплавляет металл. Температура в месте соударения достигает 5000–6000 °С. Перемещая электронный луч вдоль стыка, получают сварной шов.

Схема установки для электронно-лучевой сварки представлена на [рис. 7.14](#). Электроны, испускаемые катодом 1 электронной пушки, формируются в пучок электродом 2, расположенным непосредственно за катодом, ускоряются под действием разности потенциалов между катодом и анодом 3, составляющей 20–150 кВ и выше, затем с помощью линз 4 фокусируются в виде луча и направляются специальной отклоняющей магнитной системой 5 на обрабатываемое изделие 6. На формирующий электрод 2 подается отрицательный или нулевой по отношению к катоду потенциал. Фокусировкой достигается высокая удельная мощность луча. Ток электронного луча невелик – от нескольких миллиампер до единиц ампер.

Процессу электронно-лучевой сварки присущи две характерные особенности:

- сварка протекает в вакууме, что обеспечивает получение зеркально чистой поверхности и дегазацию расплавленного металла;
- интенсивность нагрева очень велика, что обеспечивает быстрое плавление и затвердевание металла. Шов получается мелкозернистый с высокими механическими свойствами, с минимальной шириной, что позволяет сваривать сплавы, чувствительные к нагреву.

Электронно-лучевой сваркой изготавливают детали из тугоплавких, химически активных металлов и их сплавов (вольфрамовых, танталовых, молибденовых, ниобиевых, циркониевых), а также алюминиевых и титановых сплавов и высоколегированных сталей. Металлы и сплавы можно сваривать в однородных и разнородных сочетаниях, со значительной разностью толщин, температур плавления. Минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм, максимальная – до 100 мм.

Лазерная сварка – способ сварки плавлением, при котором металл нагревают излучением лазера.

Лазерный луч представляет собой вынужденное монохроматическое излучение, длина волны которого зависит от природы рабочего тела лазера-излучателя. Оно возникает в результате вынужденных скачкообразных переходов возбужденных атомов рабочих тел на более низкие энергетические уровни.

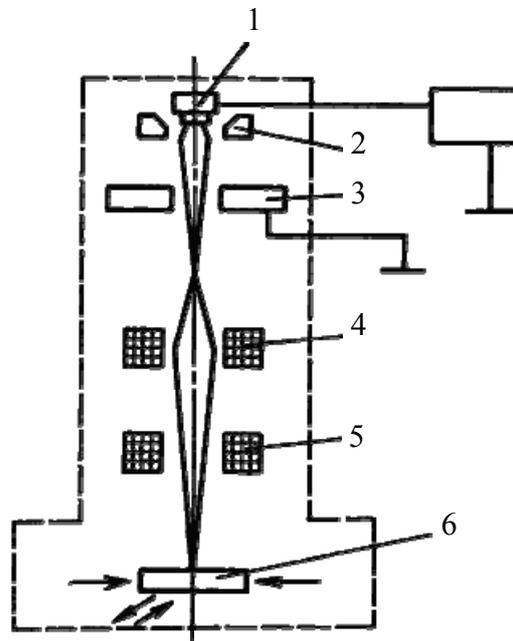


Рис. 7.14. Схема установки для электронно-лучевой сварки

Основными параметрами режимов лазерной обработки являются мощность излучения, диаметр пятна фокусировки, скорость перемещения обрабатываемого материала относительно луча.

Преимуществом лазерной сварки является быстрый точечный нагрев металла до его температуры плавления. Интенсивный сосредоточенный нагрев обуславливает и чрезвычайно большую скорость охлаждения после прекращения воздействия луча. Это позволяет свести к минимуму ширину околошовной зоны, сварочные напряжения и деформации.

Механизмы процессов при лазерной и электронно-лучевой сварке схожи, но при лазерной сварке не обязательно вакуумировать изделие.

Лазером сваривают преимущественно металлы толщиной до 1 мм, так как коэффициент полезного действия преобразования энергии в лазерное излучение довольно низкий.

7.2.8. Газовая сварка

При газовой сварке, схема которой представлена на [рис. 7.15](#), заготовки 1 и присадочный материал 2 в виде прутка или проволоки расплавляют высокотемпературным пламенем 4 газовой горелки 3.

Газовое пламя получают при сгорании горючего газа в атмосфере технически чистого кислорода. Мощность пламени регулируют сменой наконечников горелки.

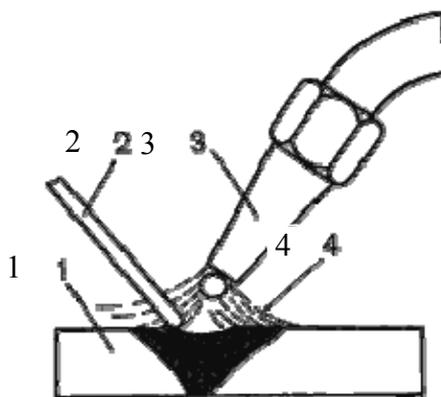


Рис. 7.15. Схема газовой сварки

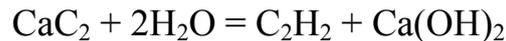
Нагрев заготовки осуществляется более плавно, чем при дуговой сварке, поэтому газовую сварку применяют для сварки: металла малой толщины (0,2–5 мм); легкоплавких цветных металлов и сплавов; металлов и сплавов, требующих постепенного нагрева и охлаждения (инструментальные стали, латуни); для подварки дефектов в чугунных и бронзовых отливках. При увеличении толщины металла снижается производительность и увеличивается деформация.

7.2.8.1. Газы, применяемые при сварке

В качестве горючих газов могут быть использованы ацетилен C_2H_2 , водород H_2 , природный газ (содержащий примерно 94 % CH_4), нефтегаз, пары бензина и керосина. В сварочном производстве обычно применяют

ацетилен: при горении в технически чистом кислороде он дает наиболее высокую температуру пламени (3150 °С) и выделяет наибольшее количество тепла (11470 ккал/м³). Ацетилен легче воздуха и кислорода. При содержании в воздухе 2,8–80 % C₂H₂ образуется взрывчатая смесь. Воспламеняется ацетилен при 420 °С, становится взрывоопасным при сжатии свыше 0,18 МПа, а также при длительном соприкосновении с медью и серебром.

Ацетилен получают из карбида кальция при взаимодействии последнего с водой. Реакция протекает с выделением значительного количества тепла:



Ацетилен для сварки поступает из генератора, в котором его получают, или из металлических баллонов. В баллонах ацетилен находится в смеси с ацетоном под давлением 1,5–1,6 МПа. Для безопасности баллон с ацетиленом заполняют древесным углем, создающим систему капиллярных сосудов.

Технический кислород (98,5–99,5 %) поступает к сварочным постам по трубопроводам под давлением 0,5–1,6 МПа или из баллонов под давлением до 15 МПа. Для понижения давления кислорода на выходе из баллона и поддержания давления постоянным при работе применяют газовые редукторы: они снижают давление с 15 до 0,1 МПа. Ацетиленовые редукторы снижают давление с 1,6 до 0,02 МПа.

Из редукторов баллонов кислород и горючий газ отдельно поступают в сварочную горелку, которая предназначена для правильного смешения кислорода с горючим газом, подачи горючей смеси к месту сварки и создания концентрированного пламени требуемой мощности.

Горелки по принципу действия разделяют на инжекторные (всасывающие) низкого давления газа и безынжекторные среднего и высокого давления. Различают одно- и многопламенные горелки.

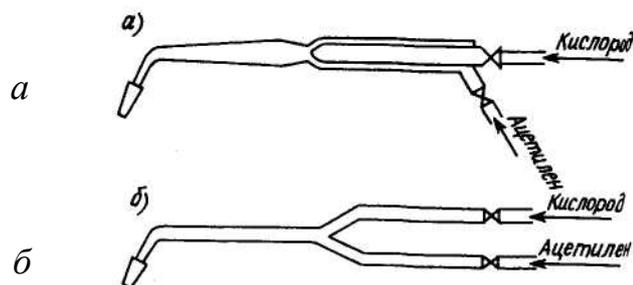


Рис. 7.16. Схемы газовых горелок: а – инжекторной; б – безынжекторной

Кислород к инжектору ([рис. 7.16, а](#)) поступает через вентиль по шлангу под рабочим давлением 0,1–0,5 МПа. Вытекая с большой скоростью из инжектора в смесительную камеру, струя кислорода создает разрежение, обеспечивающее подсос ацетилена. Ацетилен под низким давлением (0,001–0,05 МПа) поступает по шлангу, а затем через корпус горелки – в смесительную камеру, где смешивается с кислородом. Полученная горючая

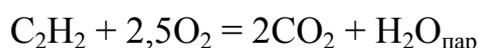
смесь поступает в мундштук. По выходе из него смесь сгорает, образуя сварочное пламя.

Безындукторная горелка (рис. 7.16, б) работает при давлении ацетилена более 0,05 МПа и кислорода до 0,5 МПа.

При зажигании горелки сначала на четверть оборота открывают вентиль кислорода, затем открывают вентиль ацетилена и поджигают выходящую из наконечника газовую смесь.

7.2.8.2. Сварочное ацетилено-кислородное пламя

Строение, температура и влияние сварочного пламени на расплавленный металл зависят от соотношения кислорода и ацетилена в горючей смеси. Горение ацетилена может быть представлено следующей реакцией, протекающей в две стадии:



В первой стадии в горелку подают один объем ацетилена и один объем кислорода ($\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CO} + \text{H}_2$).

Во второй стадии за счет кислорода окружающего воздуха протекает реакция



В зависимости от соотношения кислорода и ацетилена в исходной горючей смеси различают три вида кислородно-ацетиленового пламени:

- *нейтральное, или нормальное восстановительное, пламя* при соотношении $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 = 1 : 1,2$. Таким пламенем сваривают большинство металлов и сплавов;
- *науглероживающее пламя* при соотношении $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 < 1$, т. е. при избытке ацетилена. Ядро пламени при этом удлиняется по сравнению с ядром нормального пламени, пламя теряет резкие очертания. Такое пламя применяют при сварке чугуна и наплавке быстрорежущих сталей и твердых сплавов;
- *окислительное пламя* при соотношении $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 > 1,2$, т. е. при избытке кислорода. Пламя при этом приобретает голубоватый оттенок, размеры ядра пламени уменьшаются. Такое пламя применяют при сварке латуней.

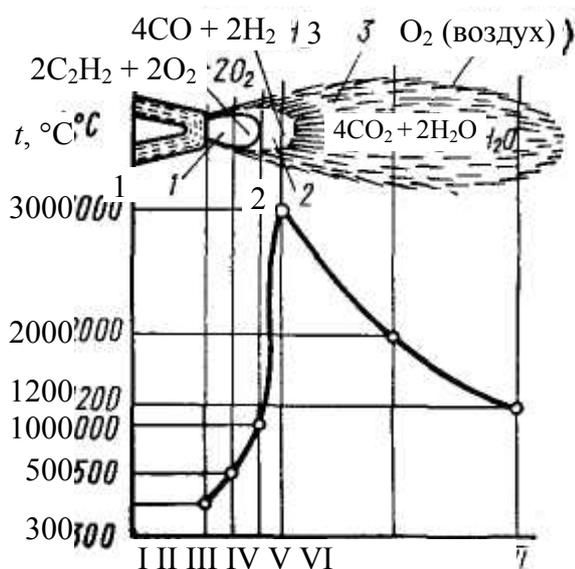


Рис. 7.17. Схема строения нормального ацетилено-кислородного пламени и график распределения температуры по его длине

На [рис. 7.17](#) показана схема строения нормального сварочного пламени, образующегося при горении ацетилена. Пламя состоит из трех зон: ядра *1*, восстановительной зоны *2* и окислительной зоны *3*. Ядро пламени имеет вид усеченного конуса с округленным концом. Эта часть пламени состоит из смеси кислорода и раскаленных продуктов разложения ацетилена и кислорода (самая яркая часть пламени).

В восстановительной зоне происходит выделение тепла в основном за счет окисления раскаленных частиц углерода в окись углерода. Наивысшая температура в этой зоне (до 3150 °С) создается на расстоянии 3–5 мм от конца ядра пламени. Эта зона имеет характерное синеватое свечение.

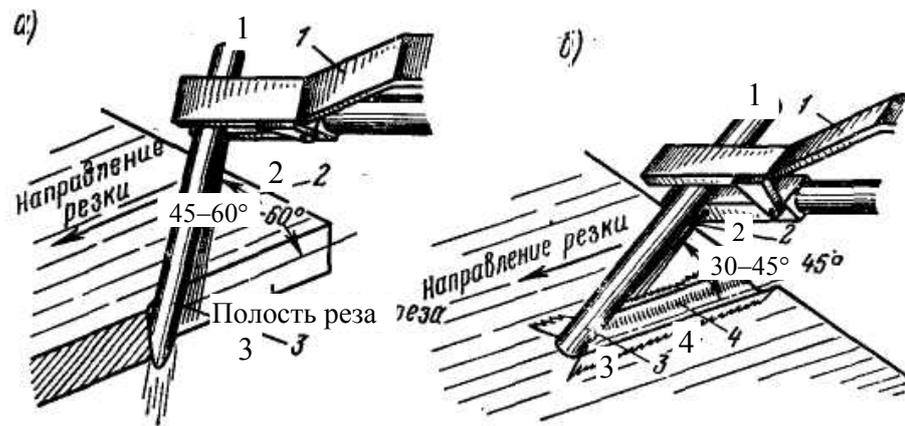
Находящиеся в восстановительной зоне продукты горения ацетилена CO и H₂ нагревают и расплавляют металл. Они также могут восстанавливать окислы, в том числе образующиеся при сварке окислы железа.

В окислительной зоне при избытке кислорода воздуха CO догорает в CO₂ и H₂ – в H₂O_{пар}. Эта часть пламени имеет желтоватую окраску с красным оттенком. Газообразные продукты этой зоны обладают окислительной способностью, однако они препятствуют контакту расплавленного металла с воздухом.

7.2.9. Резка металлов и сплавов

7.2.9.1. Электродуговая резка

Электродуговая резка металлов позволяет разделять их на части путем выплавления металла в месте реза угольными (неплавящимися) или металлическими (плавящимися) электродами.



а б

Рис. 7.18. Воздушно-дуговая резка: а – разделительная; б – поверхностная

При резке угольным электродом диаметром 10–20 мм применяют прямую полярность; сила тока равна 400–1000 А. Резку материала толщиной до 20 мм можно производить на переменном токе при силе тока 280 А.

Применение металлических электродов с толстой обмазкой повышает качество резки, уменьшает ширину реза и дает более ровные кромки.

Дуговую резку применяют при разборке старых металлоконструкций, магистральных трубопроводов, разделке металлического лома, удалении литниковой системы, резке цветных металлов, стали и чугуна, прожигании отверстий, а также при выполнении ремонтных и монтажно-сборочных работ.

Воздушно-дуговую резку стали и цветных металлов (рис. 7.18) осуществляют на постоянном токе с обратной полярностью угольным электродом при давлении воздуха 0,2–0,6 МПа. Эта резка основана на расплавлении металла и выдувании его струей сжатого воздуха. Струя сжатого воздуха 2 поступает в резак 1 и вытекает вдоль электрода 3 (рис. 7.18, а).

При поверхностной резке (рис. 7.18, б) глубина и ширина канавки 4 зависит от диаметра электрода 3. Металлические электроды улучшают качество резки.

Кислородно-дуговая резка использует одновременно тепло сварочной дуги для разогрева металла и тепло, развиваемое при горении металла в кислороде.

В последнее время применяют дуговую резку металлов (особенно сплавов на алюминиевой основе) в среде защитных газов. Способ основан на режущих свойствах электрической дуги, горящей между вольфрамовым электродом и разрезаемым материалом в смеси аргона и водорода. Для ручной резки применяют смесь из 80 % аргона и 20 % водорода, для механизированной – 65 % аргона и 35 % водорода.

7.2.9.2. Газовая резка

Газокислородная резка основана на способности некоторых металлов гореть в струе кислорода с выделением большого количества тепла. Различают два вида газовой резки металлов: разделительную и поверхностную.

Газокислородным способом можно резать только те металлы, у которых температура воспламенения ниже температуры плавления, а температура плавления образующихся окислов ниже температуры плавления металла. Окислы должны обладать хорошей жидкотекучестью и легко удаляться продувкой воздухом или кислородной струей. Для концентрации тепла теплопроводность металла должна быть низкой. Этим методом можно резать углеродистую сталь с содержанием до 0,7 % С и низколегированные конструкционные стали. При резке высокоуглеродистых сталей требуется предварительный их нагрев до 650–700 °С. Не поддаются газовой резке чугун, высоколегированные хромистые и хромоникелевые стали и цветные сплавы, так как температура плавления образующихся окислов выше температуры плавления сплавов.

Схема процесса газовой резки приведена на [рис. 7.19](#). Смесь кислорода и горючего газа направляется в кольцевой канал мундштука 2 режущей горелки. При выходе из мундштука газовая смесь загорается, образуя пламя, которое направляют на разрезаемый металл 3. После нагрева металла до требуемой температуры подача горючего газа прекращается и усиливается поступление кислорода, который при выходе из мундштука, соприкасаясь с нагретым металлом, активизирует горение. В процессе сгорания металла образуются окислы 4, которые увлекаются струей режущего кислорода 1 и затем выдуваются из полости реза.

Таким образом, газовая резка включает три процесса: подогрев металла, горение металла в среде кислорода, выдувание окислов.

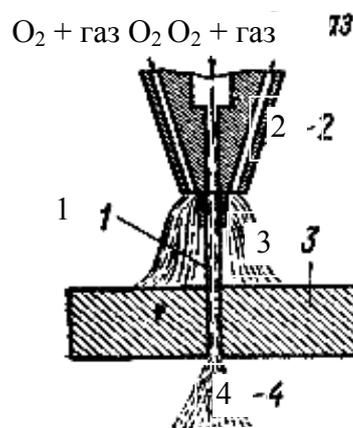


Рис. 7.19. Схема процесса газовой резки: 1 – струя режущего кислорода; 2 – режущий мундштук; 3 – металл; 4 – выдуваемые окислы

Газокислородная резка осуществляется с помощью обычного газосварочного оборудования, только вместо сварочной горелки присоединяют резак, подающий газовую смесь для подогрева металла и кислород для его сжигания. Резак имеет сменные мундштуки – подогревательные (наружные) и режущие (внутренние).

Газовую резку можно выполнять ручным и механизированным способами. При ручной резке производительность низкая, точность размеров невысокая. Механизация разделительной резки значительно повышает качество реза и производительность процесса.

7.3. Сварка давлением

7.3.1. Контактная сварка

Контактная сварка является основным видом сварки термомеханического класса. Она осуществляется с применением давления и нагрева места сварки проходящим через заготовки электрическим током. Основными видами контактной сварки являются стыковая, точечная и шовная.

7.3.1.1. Стыковая контактная сварка

Свариваемые заготовки 3 (рис. 7.20) закрепляются в зажимах стыковой машины. Зажим 2 установлен на неподвижной плите 1, а зажим 4 – на подвижной плите 5. Зажимы одновременно служат электродами и соединены гибкими шинами 6 с трансформатором. Под действием силы P заготовки сжимаются, и по ним протекает сварочный ток (рис. 7.20 и рис. 7.21).

Сварочный ток нагревает заготовки, причем наибольшее количество тепла выделяется в месте контакта (отсюда название способа) между заготовками, так как сопротивление контакта R_k является наибольшим во вторичной цепи.

Это обусловлено неровностью поверхности стыка. Даже после тщательной обработки торцы заготовок соприкасаются только в отдельных точках (рис. 7.22). Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются оксидные пленки и загрязнения, которые также увеличивают сопротивление контакта.

Электросопротивление заготовок $R_{зар}$ (на длине вылета из зажимов $2L$) и сопротивление между зажимами и заготовками $R_{эл}$ (рис. 7.21) значительно ниже, чем сопротивление на контактных поверхностях R . Количество выделяемой теплоты Q (Дж) определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 R t,$$

где I – сварочный ток, А; R – сопротивление контакта, Ом; t – время протекания тока, с.

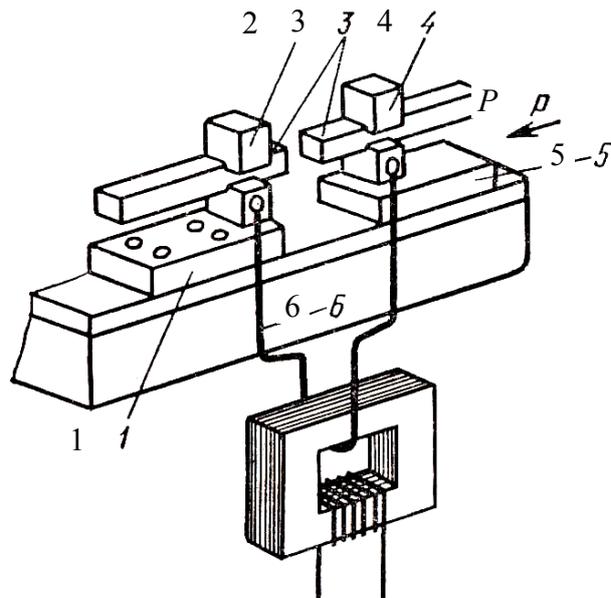


Рис. 7.20. Схема установки заготовки при стыковой контактной сварке сопротивлением

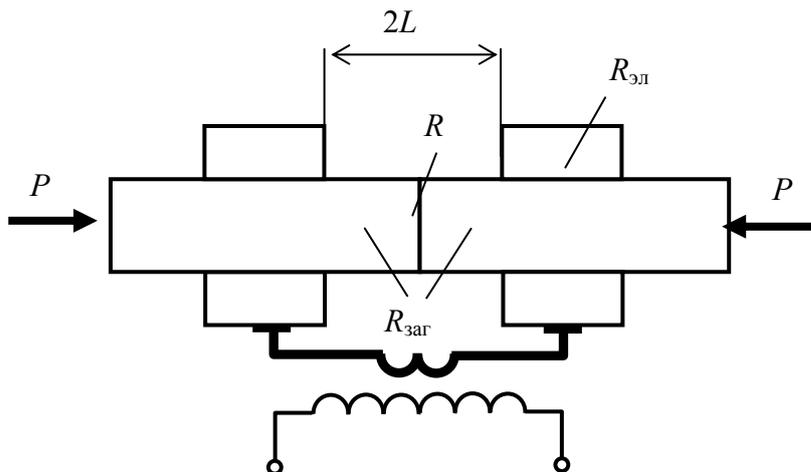


Рис. 7.21. Схема стыковой контактной сварки Сопротивлением

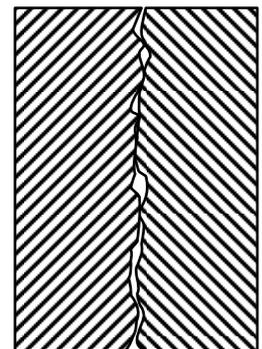


Рис. 7.22. Физический контакт

Эффективный нагрев места сварки может быть получен при больших значениях сварочного тока. Сварочный ток при контактной сварке может достигать тысяч и даже десятков тысяч ампер.

Контактная стыковая сварка осуществляется без расплавления и с расплавлением металла. Стыковую сварку с разогревом стыка до пластического состояния называют *сваркой сопротивлением*, стыковую сварку с разогревом стыка до оплавления – *сваркой оплавлением*. Различие этих способов может быть объяснено с использованием циклограмм.

Циклограмма – это графическое изображение тока I и давления P , изменяющихся в процессе сварки.

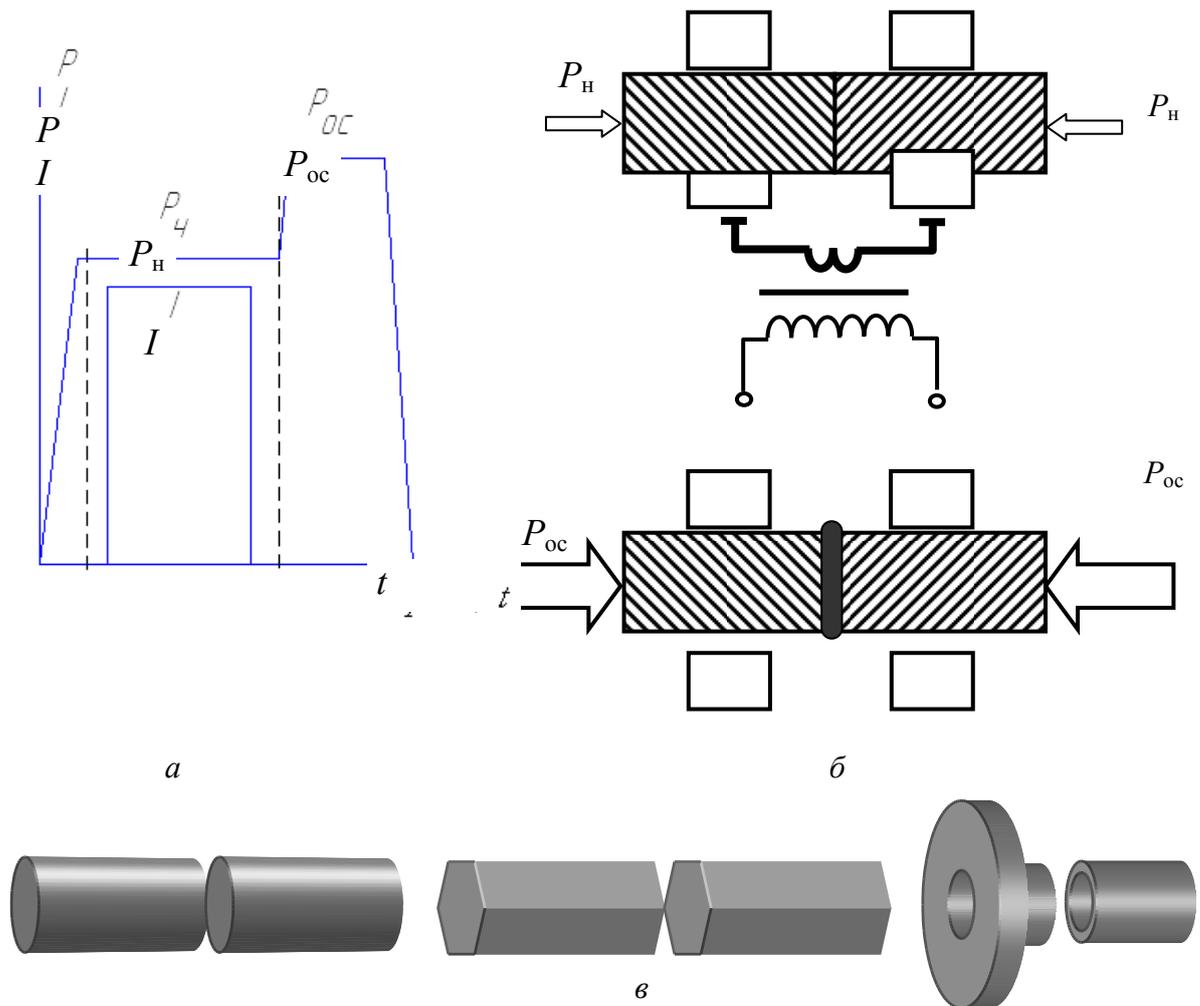


Рис. 7.23. Стыковая контактная сварка сопротивлением:
а – циклограмма; *б* – стадии сварки; *в* – типы сварных соединений

При сварке сопротивлением детали сжимают значительным усилием P_n (усилие нагрева) и пропускают ток (рис. 7.21). При протекании тока металл в месте стыка нагревается до 0,8–0,9 температуры плавления и становится пластичным, ток отключают (рис. 7.23, *а, б*) и создают усилие осадки $P_{ос}$. В результате под действием осевой силы происходит пластическая деформация. Микронеровности в месте стыка снимаются, пленки разрушаются, поверхностные атомы сближаются до расстояний, соизмеримых с параметром кристаллической решетки, что обеспечивает возможность образования межатомных связей между свариваемыми частями. Образуется сварное соединение.

При данном способе трудно обеспечить равномерный нагрев по всей поверхности стыка, поэтому сварку сопротивлением применяют для соединения изделий небольшого сечения (до 200 мм²) с простым профилем (круг, квадрат, шестигранник).

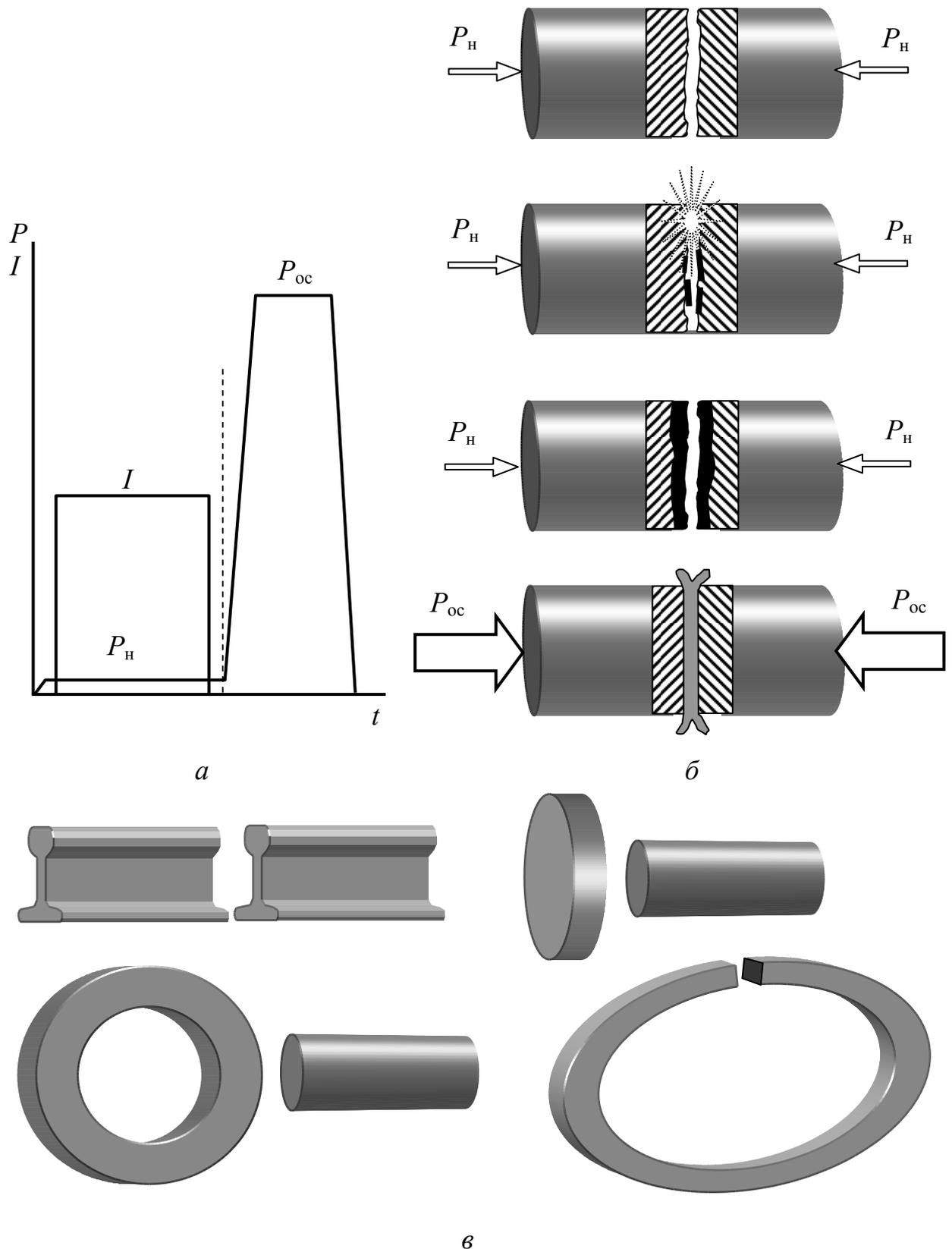


Рис. 7.24. Стыковая контактная сварка оплавлением:
 а – циклограмма; б – стадии сварки; в – типы сварных соединений

Сущность сварки оплавлением (рис. 7.24) заключается в том, что свариваемые заготовки сближают при включенном сварочном трансформаторе. Касание поверхностей происходит по отдельным выступам. Ввиду того,

что площадь образовавшихся контактов очень небольшая, плотность тока, протекающего через эти контакты, настолько велика, что происходит мгновенное оплавление металла с образованием жидких перемычек, которые под действием паров металла разрушаются. Часть металла в виде искр выбрасывается из стыка. Вместе с жидким металлом выбрасываются загрязнения, которые присутствуют на поверхности заготовок.

Продолжающееся сближение заготовок приводит к образованию новых перемычек и их оплавлению. Непрерывное образование и разрушение контактов-перемычек между торцами приводит к образованию на торцах слоя жидкого металла. После этого ток отключают и производят осадку с усилием $P_{ос}$. При осадке жидкий металл выдавливается наружу (вместе с окислами и загрязнениями) и, застывая, образует *грят*, который обычно удаляют в горячем состоянии.

Различают прерывистую и непрерывную стыковую контактную сварку оплавлением. При непрерывной сварке заготовки на стадии оплавления сближаются с постоянной, но очень малой скоростью. При прерывистой сварке происходит многократное замыкание и размыкание заготовки (подвижному зажиму придают возвратно-поступательное движение).

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением: торцы заготовок перед сваркой не требуют тщательной подготовки, можно сваривать заготовки с сечением сложной формы и большой площадью, а также разнородные металлы.

Стыковую сварку оплавлением применяют для соединения заготовок до 100 000 мм². Типичными изделиями являются элементы трубчатых конструкций, колеса, рельсы, железобетонная арматура, трубы.

7.3.1.2. Точечная контактная сварка

Точечную контактную сварку применяют преимущественно при соединении листовых заготовок. Свариваемые заготовки *1* собирают внахлестку (рис. 7.25, *а*), сжимают между двумя медными электродами *2* и пропускают электрический ток от сварочного трансформатора *3*. Циклограмма процесса точечной контактной сварки аналогична циклограмме стыковой сварки сопротивлением (рис. 7.23, *а*).

При кратковременном (0,01–0,5 с) протекании тока выделяется теплота в заготовках и электродах. В связи с тем, что наибольшим электрическим сопротивлением обладает контакт между заготовками и электроды, как правило, охлаждаются водой и отводят теплоту с поверхности заготовок, интенсивный нагрев металла происходит только в месте контакта. Здесь металл расплавляется и появляется жидкое ядро. После образования жидкого ядра ток выключают и создают усилие осадки $P_{ос}$. Ядро затвердевает, образуя сварную точку.

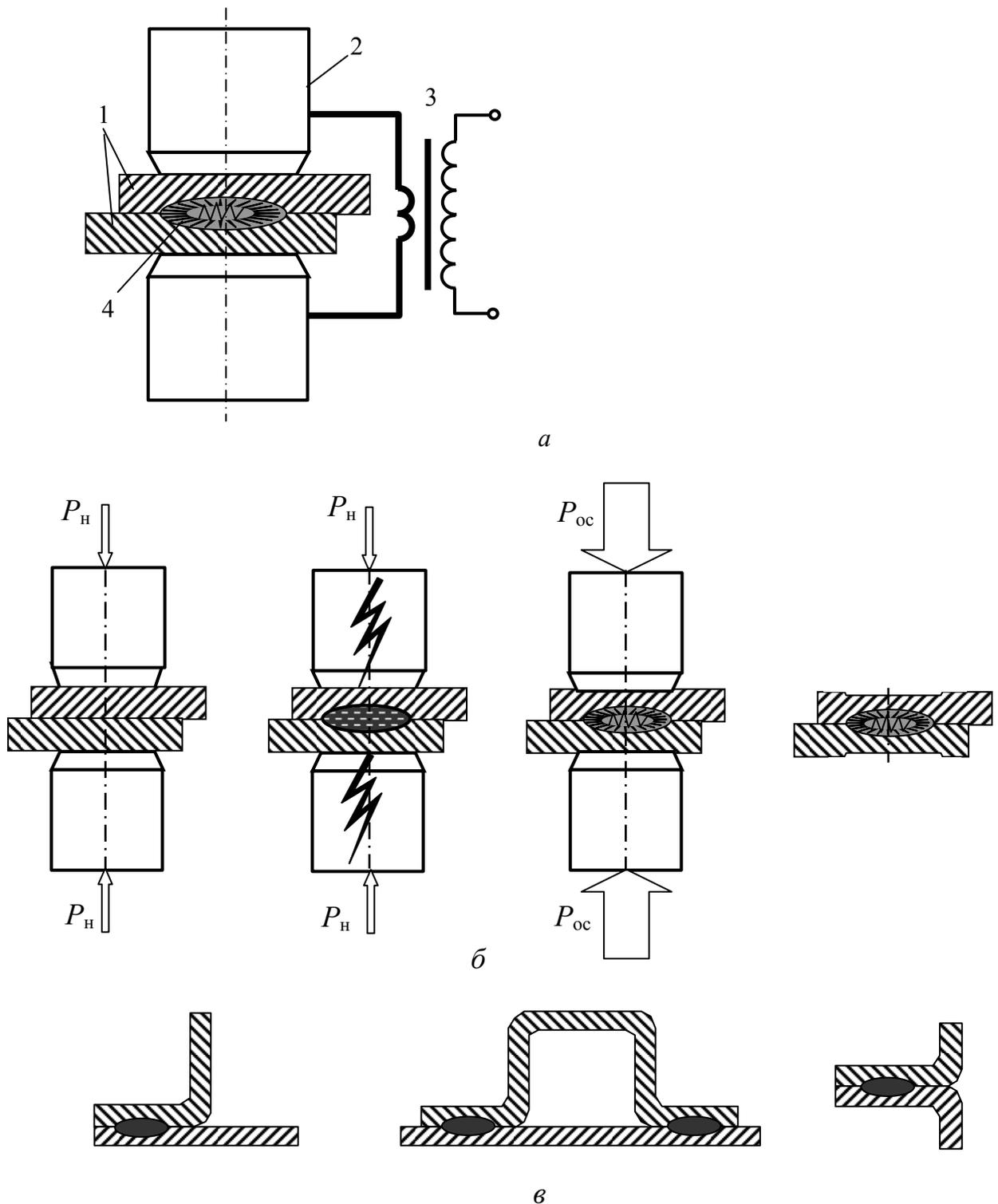


Рис. 7.25. Точечная контактная сварка: а – схема сварки; б – стадии сварки; в – типы сварных соединений

Кристаллизация металла происходит при повышенном давлении электродов, что предотвращает образование в ядре точки дефектов усадочного характера – пор, трещин, рыхлого металла. Стадии цикла точечной сварки с проковкой показаны на [рис. 7.25, б](#).

Перед сваркой контактные поверхности деталей зачищают металлической щеткой, пескоструйной обработкой или травлением и обезжиривают

растворителями. Это необходимо для обеспечения стабильного процесса, который зависит от постоянства контактного сопротивления.

Контактная точечная сварка применяется для получения из листовых заготовок корпусных конструкций автомобилей, комбайнов, тракторов, приборов.

7.3.1.3. Шовная контактная сварка

Для образования непрерывного сварного соединения (шва) используют шовную контактную сварку. Постановкой последовательного ряда перекрывающихся друг друга точек получают герметичный сварной шов (рис. 7.26, а).

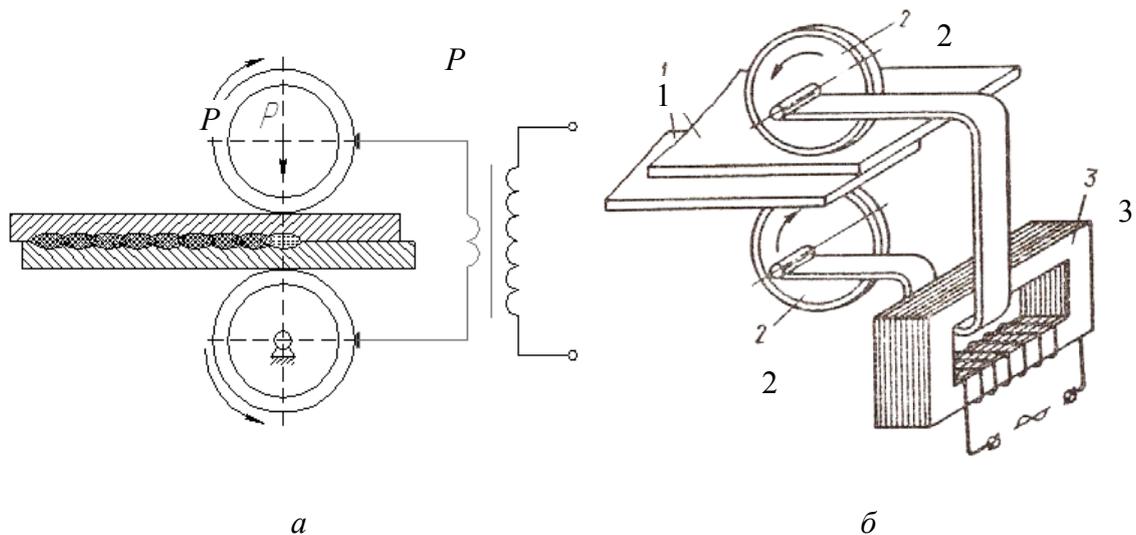


Рис. 7.26. Шовная контактная сварка:
а – схема формирования сварного шва; б – схема процесса

При шовной сварке подвод тока от трансформатора 3, передачу усилия к деталям 1 и их перемещение осуществляют вращающимися дисковыми электродами – роликами 2 (рис. 7.26, б).

Шовную сварку применяют при изготовлении различных емкостей с толщиной стенок 0,3–3 мм, где требуются герметичные швы, – бензобаки, трубы, сифоны, резервуары и др.

7.3.2. Диффузионная сварка

Диффузионной сваркой (рис. 7.27) соединяют заготовки в твердом состоянии в вакууме приложением сдавливающих сил при повышенной температуре. Тщательно зачищенные свариваемые заготовки 1 собирают, помещают в вакуумную камеру 2 (давление $133 \cdot (10^{-3} - 10^{-5})$ Па), сдавливают и затем нагревают специальным источником тепла до температуры рекристаллизации, равной $0,4T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления). В начальной

стадии процесса создаются условия для образования металлических связей между соединяемыми поверхностями. Низкое давление способствует удалению (испарению) поверхностных пленок, а высокая температура нагрева и давление приводят к уменьшению неровностей поверхностей и сближению их до нужного расстояния ($4 \cdot 10^{-8}$ см).

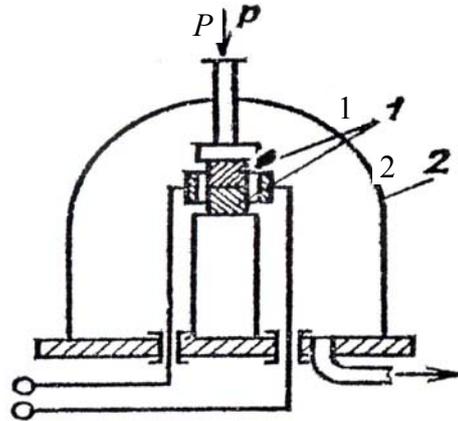


Рис. 7.27. Схема диффузионной сварки

Последующая выдержка вызывает диффузию атомов материалов свариваемых заготовок и образование промежуточных слоев, увеличивающих прочность соединения. Время диффузионной сварки зависит от химического состава соединяемых заготовок, степени их очистки, температуры нагрева и составляет 10–30 мин.

Достоинством этого способа является возможность соединения заготовок из разнообразных материалов. Диффузионную сварку применяют в электротехнической, радиотехнической и других отраслях промышленности.

7.3.3. Сварка трением

Сварка трением образует соединение в результате пластического деформирования заготовок, предварительно нагретых в месте контакта теплотой, выделившейся в результате их трения (рис. 7.28).

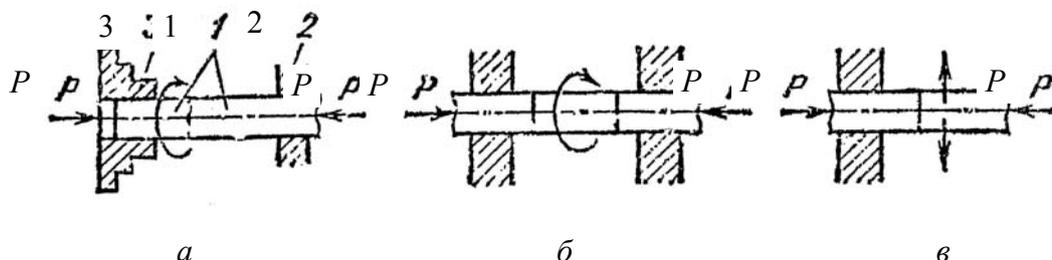


Рис. 7.28. Схемы сварки трением

Основным отличием сварки трением от других видов сварки давлением с подогревом является способ нагрева свариваемых поверхностей.

Свариваемые заготовки 1 (рис. 7.28, а) устанавливают соосно в зажимах машины, один из которых 2 неподвижен, а второй 3 может совершать вращательные и поступательные (вдоль оси заготовок) движения. Заготовки сжимаются силой P , и включается механизм вращения. На соединяемых поверхностях возникают силы трения, и работа на преодоление этих сил превращается в теплоту, выделяющуюся на поверхность трения. При достижении температуры поверхностей 980–1300 °С вращение заготовок прекращают и их дополнительно сдавливают (проковка).

7.3.4. Общие принципы конструирования сварных заготовок

Проектирование изделий выполняют с учетом обеспечения эксплуатационных характеристик сварных конструкций и их технологичности. На стадии проектирования изделия необходимо определить принципиальную возможность получения сварной заготовки. Затем устанавливают последовательность сборочно-сварных операций и оценивают ожидаемые сварочные деформации (коробление), точность размеров и конфигурацию сварного изделия после механической обработки.

Рациональный вид сварки выбирают с учетом конструкторско-технологических признаков изделия, технико-экономических показателей процесса сварки и программы выпуска сварных конструкций. Одновременно с выбором вида сварки обычно назначают тип сварного соединения.

После этого разделяют заготовки на свариваемые элементы. Место деления изделия выбирают с учетом двух обстоятельств: во-первых, в результате деления должны образовываться элементы (исходные заготовки), которые могут быть получены из профилей или технологичных отливок и поковок; во-вторых, зона сварки должна быть удобной для осуществления выбранного способа сварки, доступной для сварочного инструмента и присадочного материала.

В случае если исходная заготовка – профиль, проектирование свариваемых элементов сводится к выбору его оптимальных размеров и определению разделки кромок в соответствии с выбранным типом сварного шва. При необходимости на исходных заготовках предусматривают сборочные и фиксирующие элементы, а также припуски на механическую обработку после сварки. Ввиду значительного влияния формы сварного соединения и режимов сварки на прочность изделия конструирование заготовки должно вестись одновременно с проработкой технологии ее изготовления.

7.3.5. Напряжения и деформации при сварке

В процессе изготовления сварных конструкций в них возникают напряжения и деформации. Сварочные напряжения, превышающие предел текучести металла, вызывают пластическую деформацию конструкции, что приводит к изменению размеров и формы изделия. Если сварочные напряже-

ния превышают предел прочности, то происходит образование трещин в шве или в зоне термического влияния (ЗТВ).

Сварочные напряжения и деформации возникают в результате неравномерного нагревания заготовок при сварке, усадке и структурных превращениях в металле в процессе охлаждения.

Рассмотрим несколько примеров.

При местном нагреве стальной пластины, свободно лежащей на сварочном столе, ее длина увеличивается на ΔL (рис. 7.29, а). Это увеличение зависит от коэффициента линейного расширения материала заготовок, длины нагретой зоны, а также от температуры нагрева. После охлаждения пластина приобретает свои первоначальные размеры и в ней не будет ни внутренних напряжений, ни остаточных деформаций.

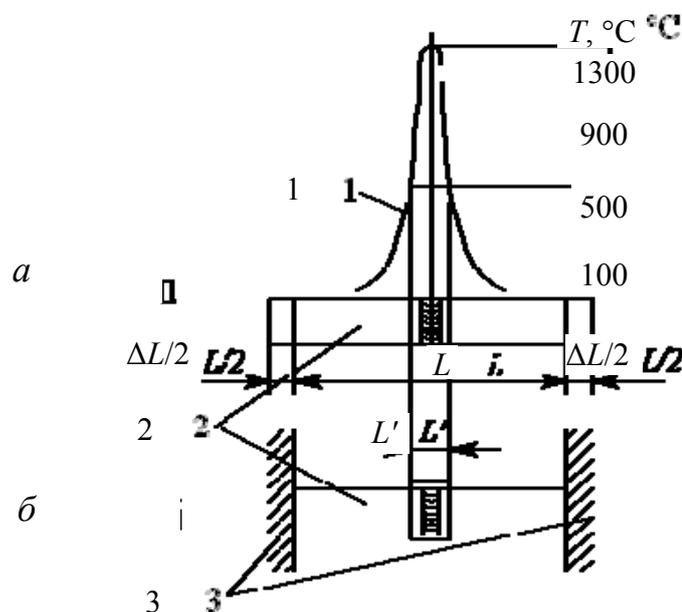


Рис. 7.29. Местный нагрев незакрепленной (а) и закрепленной обоими концами (б) пластин: 1 – кривая распределения температур; 2 – пластины; 3 – жесткое крепление

При местном нагреве этой же пластины, жестко закрепленной с обоих концов (рис. 7.29, б), она не сможет свободно удлиняться, поэтому в ней возникнут сжимающие внутренние напряжения. При температуре нагрева выше 600 °C сжимающие напряжения превысят предел текучести металла нагретого участка. Поэтому в этой зоне будет протекать пластическая деформация сжатия и на длине L' произойдет увеличение толщины.

При охлаждении пластина должна укоротиться, но этому будет препятствовать жесткое закрепление, в результате чего в ней возникнут растягивающие напряжения.

Аналогичным образом возникают внутренние напряжения и деформации при наплавке валика на кромку полосы (рис. 7.30, а). Наплавленный валик и нагретая часть полосы будут расширяться и растягивать холодную часть заготовки, вызывая в ней деформации растяжения с изгибом. Валик и

нагретая часть образца сожмется, поскольку тепловому расширению будут препятствовать холодные части полосы. Эпюра распределения напряжений в образце имеет вид, представленный на [рис. 7.30, б](#). В результате такого распределения напряжений полоса изогнется выпуклостью вверх.

В процессе остывания наплавленный валик и нагретая часть полосы, претерпев пластические деформации сжатия, будут укорачиваться. Под действием усадочных сил полоса прогнется выпуклостью вниз ([рис. 7.30, в](#)). Этому процессу будут препятствовать слои холодного металла, поэтому в нагретой части полосы возникнут растягивающие напряжения, а в холодной – сжимающие ([рис. 7.30, г](#)).

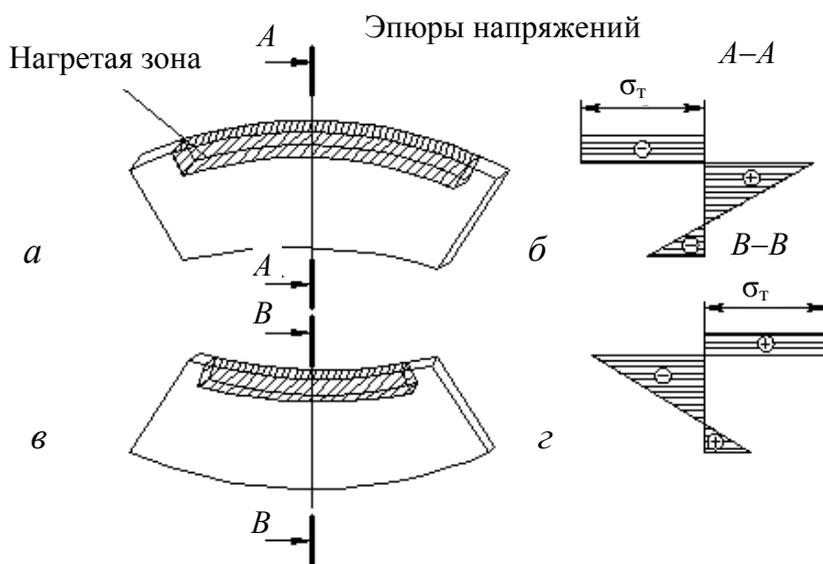


Рис. 7.30. Возникновение напряжений и деформаций при наплавке валика на кромку полосы металла: *а* – деформация полосы в процессе наплавки валика на кромку; *б* – эпюра распределения напряжений в полосе при наплавке; *в* – деформация полосы после остывания; *г* – эпюра распределения напряжений в полосе с наплавленной кромкой; σ_T – предел текучести материала полос

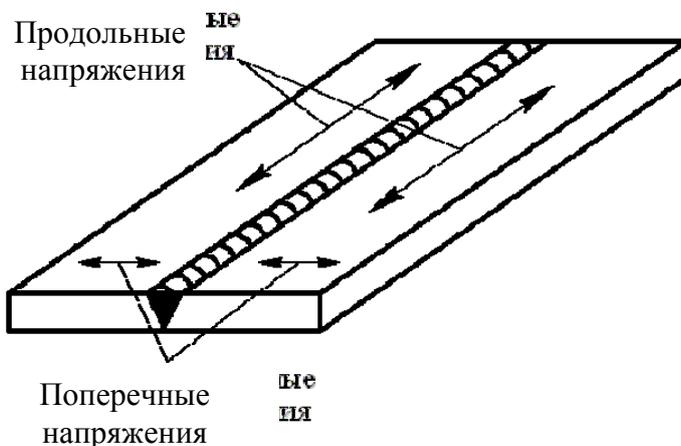


Рис. 7.31. Направления действия продольных и поперечных внутренних напряжений

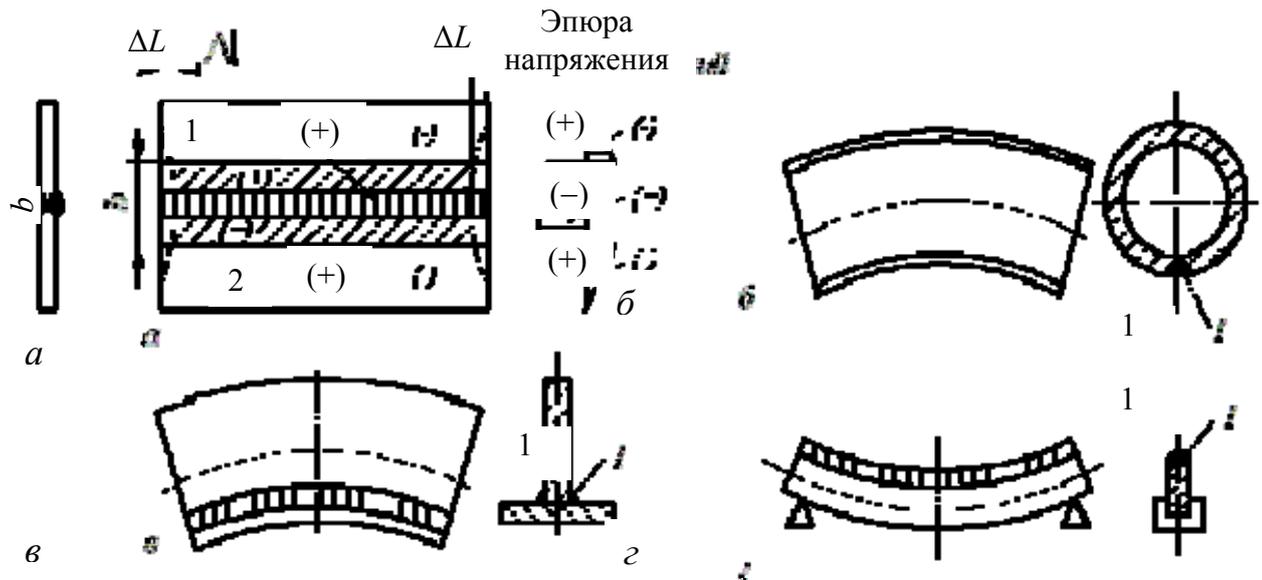


Рис. 7.32. Деформации сварных изделий от продольной усадки наплавленного металла: *a* – при симметричном расположении швов; *б, в* – при несимметричном расположении швов; *г* – при наплавке валика на кромку полосы; 1 – сварной шов; 2 – зона нагрева; ΔL – величина деформации от продольной усадки; b – ширина зоны нагрева

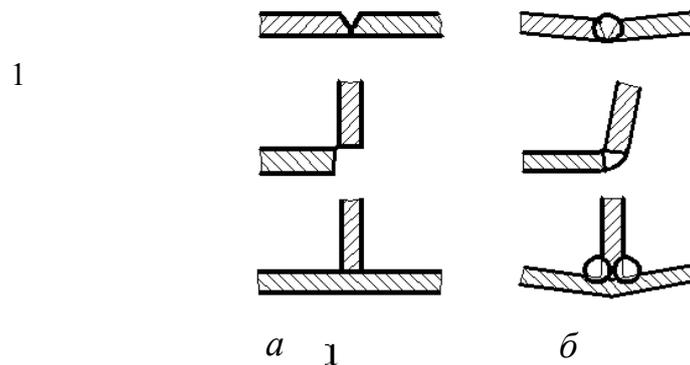


Рис. 7.33. Деформация сварных изделий от поперечной усадки наплавленного металла: *a* – до сварки; *б* – после сварки

При изготовлении изделий с использованием сварки плавлением соединения происходит продольная и поперечная усадка металла шва, поэтому образуются продольные и поперечные внутренние напряжения (рис. 7.31). Эти напряжения вызывают деформацию сварных изделий. В результате продольной усадки возникает коробление изделий в продольном направлении (рис. 7.32). Поперечная усадка, как правило, приводит к угловым деформациям, т. е. к короблению в сторону большего объема расплавленного металла (рис. 7.33).

7.3.6. Дефекты в сварных соединениях. Методы контроля качества

Дефекты сварных соединений при ручной электродуговой сварке (РЭДС). К наиболее распространенным дефектам, возникающим при РЭДС, относятся (рис. 7.34):

- наплыв (кромки не прогреты, много электродного металла);
- подрез (кромки недогреты, мало электродного металла);
- непровар (низкий сварочный ток, большая скорость сварки);
- утяжки (неравномерный режим сварки).

Горячие трещины образуются в шве и в зоне термического влияния (околошовной зоне) при температуре, близкой к температуре плавления. Между зернами могут образоваться легкоплавкие прослойки (обычно эвтектики с серой), по которым и происходит разрушение под действием сварочных напряжений (рис. 7.35, а).

Методы предотвращения: снижение количества примесей (особенно серы) в металле шва, правильный выбор режима сварки и формы шва.

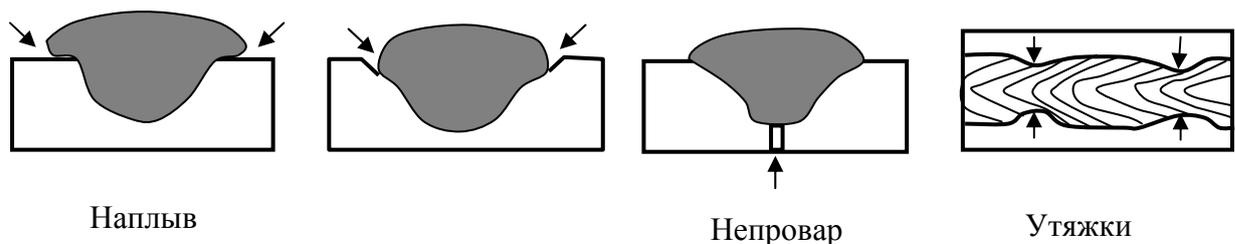


Рис. 7.34. Наружные дефекты сварных соединений

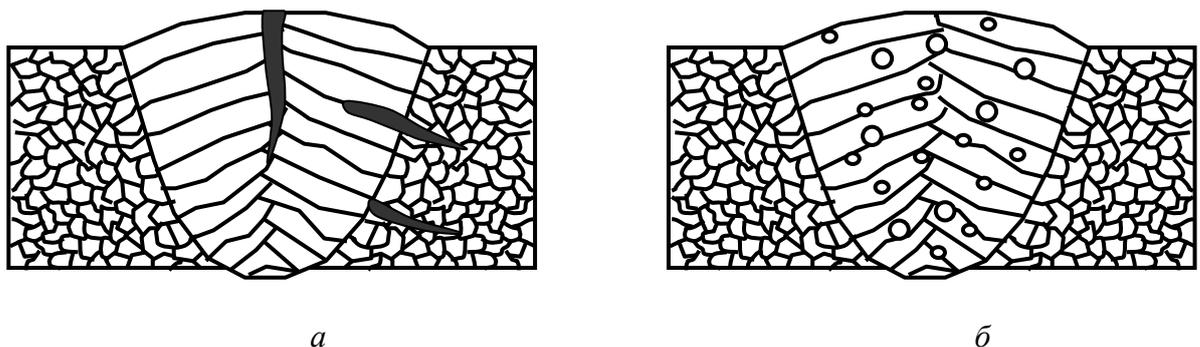


Рис. 7.35. Внутренние дефекты: а – трещины; б – поры



Рис. 7.36. Коробление при сварке

Холодные трещины образуются в шве и в зоне термического влияния при температуре, близкой к комнатной, в результате насыщения шва водородом (флокены), образования закалочных структур, роста зерна ([рис. 7.35, а](#)).

М е т о д ы п р е д о т в р а щ е н и я: снижение количества углерода, предварительный подогрев свариваемых деталей, защита шва от водорода.

Поры – это газовые включения в твердом металле шва ([рис. 7.35, б](#)). Они образуются при низкой жидкотекучести металла шва, плохой газопроницаемости шлаковой пленки, слишком высокой скорости охлаждения. Газы попадают в жидкий металл либо из воздуха (при плохой защите сварочной дуги), либо через сварочные материалы (плохо очищенные кромки заготовки, влажные электроды). Попав в металл, газы растворяются в нем при высокой температуре и потом при охлаждении выделяются из-за снижения растворимости.

М е т о д ы п р е д о т в р а щ е н и я: надежная защита дуги, зачистка кромок, подготовка сварочных материалов, правильный выбор технологии и режима сварки.

Если дефекты все же получены, их необходимо вырезать и это место заварить снова.

Коробление – изменение геометрических размеров и формы сварного соединения под действием сварочных напряжений ([рис. 7.36](#)).

М е т о д ы п р е д о т в р а щ е н и я: правильный выбор схемы сборки изделия, порядка наложения швов и режима сварки.

Потеря специальных свойств, т. е. тех свойств, которые определяют эксплуатационную надежность данной сварной конструкции. Например, потеря коррозионной стойкости, теплостойкости, жаропрочности и других свойств.

М е т о д п р е д о т в р а щ е н и я: правильный выбор сварочных материалов, способа и режима сварки.

Контроль качества РЭС. Ручная сварка удобна при выполнении коротких и криволинейных швов в любых пространственных положениях, а также для получения швов в труднодоступных местах. Она пока незаменима при монтажных работах и сборке конструкций сложной формы.

Качество сварных соединений обеспечивают предварительным контролем заготовок, текущим контролем за процессом сварки и приемочным контролем сварных соединений. В зависимости от нарушения целостности соединения при контроле различают разрушающие и неразрушающие методы контроля.

Разрушающие испытания проводят обычно на образцах-свидетелях, моделях и реже на самих изделиях. Образцы-свидетели изготавливают из того же материала и по той же технологии, что и сварные соединения изделий. Механические испытания соединений и металла шва проводят на растяжение, изгиб, сплющивание и т. п. По характеру нагрузки различают статические, динамические и усталостные испытания. Методы разрушающего контроля, как правило, позволяют получить численные данные, характеризующие механические свойства соединений.

Неразрушающие испытания осуществляют обычно на самих изделиях, при этом оценивают физические свойства, которые косвенно характеризуют качество изделий. Методы неразрушающего контроля сварных соединений в зависимости от характера физических полей или движущихся масс, взаимодействующих с контролируемым объектом, подразделяют на пять видов: радиационный, акустический (ультразвуковой), магнитный, капиллярный и течеискателем.

В настоящее время при контроле сварных соединений и изделий применяют все описанные способы контроля. Однако ни один из них не универсален, поэтому важен не только правильный выбор метода контроля, но и их комбинирование, сочетание разрушающих и неразрушающих испытаний.

Дефекты сварных соединений при контактной сварке

Непровар, или малый диаметр точечного соединения, наблюдается при малой силе тока и недостаточном времени его протекания, завышенном давлении или большом диаметре электродов, при плохой зачистке свариваемых поверхностей.

Пережог, или выплеск расплавленного металла, возникает при недостаточном давлении и малом диаметре электродов, слишком высоком токе или завышенном времени его включения, при плохой зачистке деталей или электродов, при малом удалении электродов от кромок деталей, при перекосе деталей относительно электродов.

Трещины и радиальные раковины обусловлены малым временем включения тока, малым временем проковки и недостаточным давлением на электродах.

Глубокие вмятины от электродов на поверхности деталей возникают при завышении тока, времени его протекания и давления на электродах, перекосе деталей и плохой подготовке электродов (контактная поверхность не является плоской).

Контроль качества контактной сварки проводят внешним осмотром и механическими испытаниями на прочность. Внешний осмотр позволяет выявить правильность отпечатков точек, наличие прожогов, трещин и других внешних дефектов.

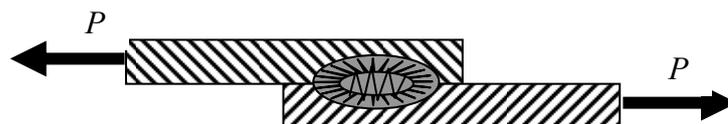


Рис. 7.37. Схема испытания на срез

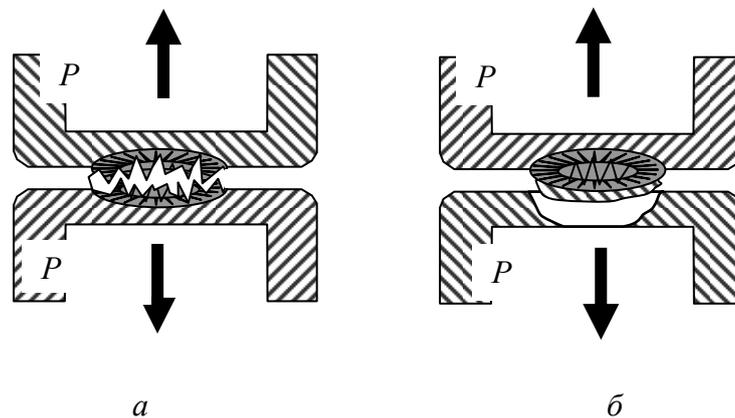


Рис. 7.38. Разрушение при испытании на отрыв: *а* – разрушение по сварной точке (сварка некачественная); *б* – разрушение по основному металлу (сварка качественная)

При механических испытаниях устанавливают размер ядра точки, сравнительную прочность сварной точки и основного металла, прочность сварного соединения.

При испытании на срез определяют величину разрушающей нагрузки, которая должна отвечать техническим требованиям ([рис. 7.37](#)).

Сварку считают качественной, если при испытании на отрыв разрушение происходит по основному металлу с образованием сквозного отверстия ([рис. 7.38](#)).

7.4. Пайка

Пайка – процесс получения неразъемного соединения заготовок без их расплавления путем смачивания поверхностей жидким припоем с последующей его кристаллизацией. Расплавленный припой затекает в специально создаваемые зазоры между деталями и диффундирует в металл этих деталей. Таким образом протекает процесс взаимного растворения металла деталей и припоя, в результате чего образуется сплав более прочный, чем припой.

Образование соединения без расплавления основного металла обеспечивает возможность распая соединения.

Качество паяных соединений (прочность, герметичность, надежность и др.) зависит от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, типа соединения.

Сплав цветных металлов сложного состава – припой должен хорошо растворять основной металл, обладать смачивающей способностью, быть дешевым и недефицитным. Припои представляют собой. По температуре плавления припои подразделяют на особолегкоплавкие (температура плавления ниже 145 °С), легкоплавкие (145–450 °С), среднеплавкие (450–1100 °С) и тугоплавкие (выше 1050 °С). К особолегкоплавким и легкоплавким припоям относятся оловянно-свинцовые, на основе висмута, индия, олова, цинка, свинца. К среднеплавким и тугоплавким относятся припои медные, медно-

цинковые, медно-никелевые, с благородными металлами (серебром, золотом, платиной). Припой изготавливают в виде прутков, листов, проволок, полос, спиралей, дисков, колец, зерен, которые укладывают в место соединения.

При пайке применяются флюсы для защиты места спая от окисления при нагреве сборочной единицы, обеспечения лучшей смачиваемости места спая расплавленным металлом и растворения металлических окислов. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюсы могут быть твердые, пастообразные и жидкие. Для пайки наиболее применимы флюсы: бура, плавикový шпат, борная кислота, канифоль, хлористый цинк, фтористый калий.

Пайку точных соединений производят без флюсов в защитной атмосфере или в вакууме.

В зависимости от способа нагрева различают пайку газовую, погружением (в металлическую или соляную ванну), электрическую (дуговая, индукционная, контактная), ультразвуковую.

В единичном и мелкосерийном производстве применяют пайку с местным нагревом посредством паяльника или газовой горелки.

В крупносерийном и массовом производстве применяют нагрев в ваннах и газовых печах, электронагрев, импульсные паяльники, индукционный нагрев, нагрев токами высокой частоты.

Перспективным направлением развития технологии пайки металлических и неметаллических материалов является использование ультразвука. Генератор ультразвуковой частоты и паяльник с ультразвуковым магнетострикционным вибратором применяются для безфлюсовой пайки на воздухе и пайке алюминия. Оксидная пленка разрушается за счет колебаний ультразвуковой частоты.

Процесс пайки включает: подготовку сопрягаемых поверхностей деталей под пайку, сборку, нанесение флюса и припоя, нагрев места спая, промывку и зачистку шва.

Детали для пайки тщательно подготавливаются: их зачищают, промывают, обезжиривают.

Зазор между сопрягаемыми поверхностями обеспечивает диффузионный обмен припоя с металлом детали и прочность соединения. Зазор должен быть одинаков по всему сечению.

Припой должен быть зафиксирован относительно места спая. Припой закладывают в месте спая в виде фольговых прокладок, проволочных контуров, лент, дроби, паст вместе с флюсом или наносят в расплавленном виде, при автоматизированной пайке – в виде пасты с помощью шприц-установок.

При возможности предусматриваются средства механизации – полуавтоматы и автоматы для газовой, электрической пайки.

Паяные соединения контролируют по параметрам режимов пайки, внешним осмотром, проверкой на прочность или герметичность, методами дефекто- и рентгенографии.

ГЛАВА 8. КОМБИНИРОВАННЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Комплексная технология изготовления машиностроительных конструкций предусматривает получение их составных, относительно простых частей различными, наиболее рациональными для данных условий методами формообразования. В качестве составных частей свариваемой конструкции могут быть применены заготовки, полученные методами литья, прокатки, штамповки и т. д. Примером такой конструкции может являться корпус заднего моста автомобиля, представленного на [рис. 8.1](#): корпус дифференциала 6 и крышка 5 корпуса дифференциала выполняют методами литья, кожух 3 – методом прокатки, корпус подшипника полуосей 1 – методами штамповки, сборку всей конструкции осуществляют методами контактной стыковой (шов 2) и электродуговой (шов 4) сварки. Исключение из технологического комплекса хотя бы одного из применяемых методов формообразования неизбежно приведет к усложнению технологии и удорожанию продукции.

Применение комплексной технологии требует достаточно высокого уровня развития каждого из способов формообразования, позволяющих получать отдельные заготовки высокого качества из нужных материалов. Например, корпус, получаемый литьем, должен быть изготовлен из стали, обладающей хорошей свариваемостью. Штампованные детали желательно выполнять из материалов того же состава, что и литые, обеспечивая тем самым достаточно простой процесс сварки однородных материалов.

Крупногабаритные ответственные конструкции большой массы изготавливают из заготовок, полученных прокаткой, соединяя их электродуговой сваркой. В качестве примера можно рассмотреть стрелу башенного подъемного крана, секции которой соединены электродуговой сваркой в защитной атмосфере углекислого газа ([рис. 8.2](#)).

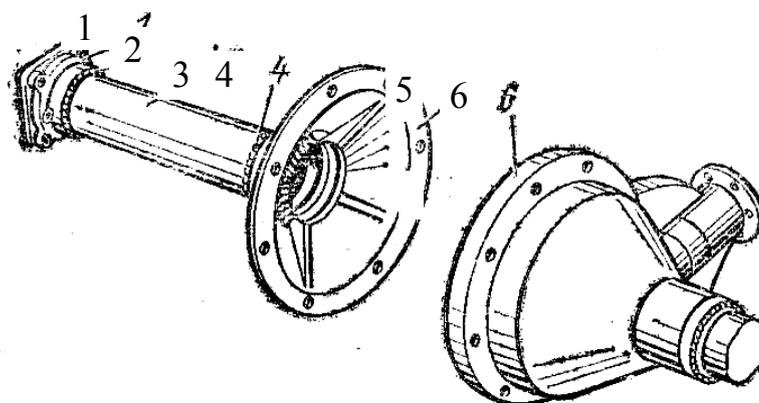


Рис. 8.1. Корпус заднего моста грузового автомобиля: 1 – корпус подшипника; 2 – шов стыковой контактной сварки; 3 – кожух; 4 – шов дуговой сварки; 5 – крышка корпуса дифференциала; 6 – корпус дифференциала

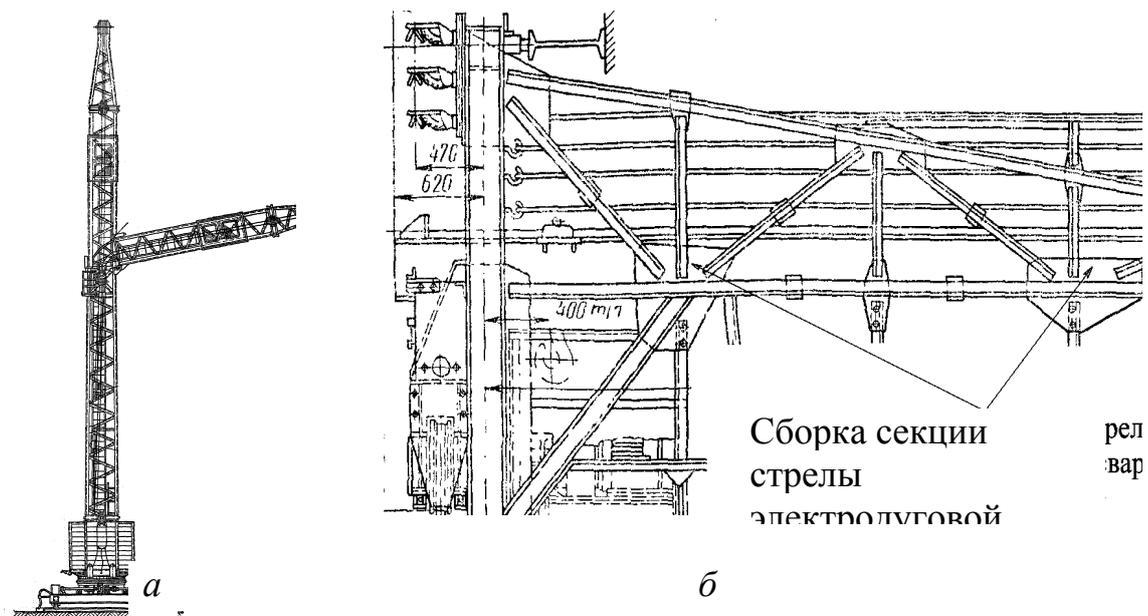


Рис. 8.2. Башенный кран (а) и секция стрелы подъемного башенного крана (б)

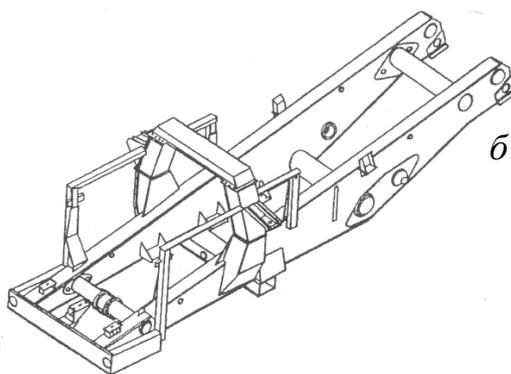


Рис. 8.3. Цельносварная рама автомобиля-самосвала «БелАЗ»

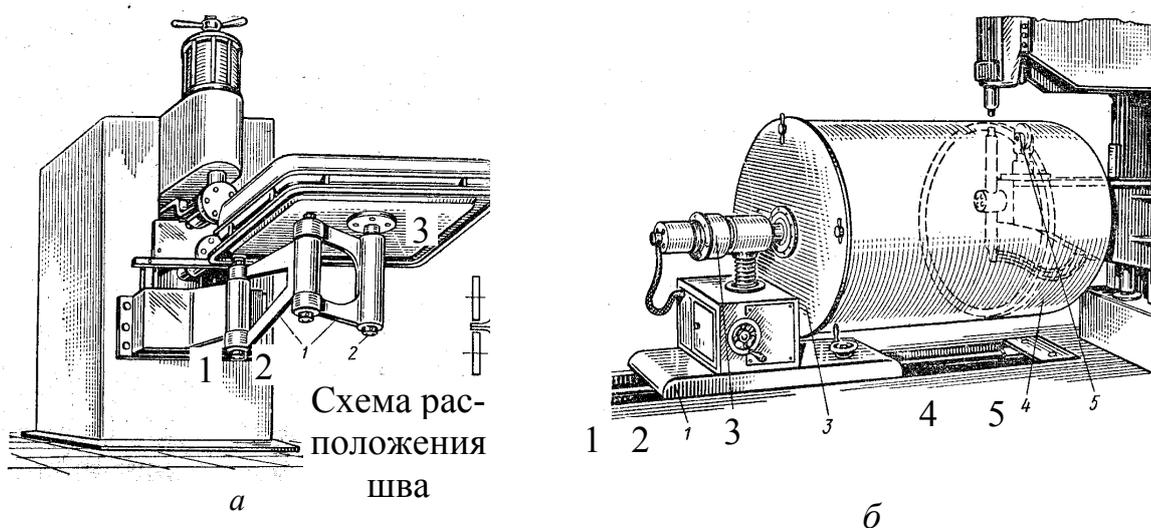


Рис. 8.4. Контактная сварка: а – шовная (бензобака); б – точечная (обечайки); 1 – тележка; 2 – механизм шагового поворота; 3 – планшайба торцевого вращателя; 4 – деталь; 5 – опорные ролики

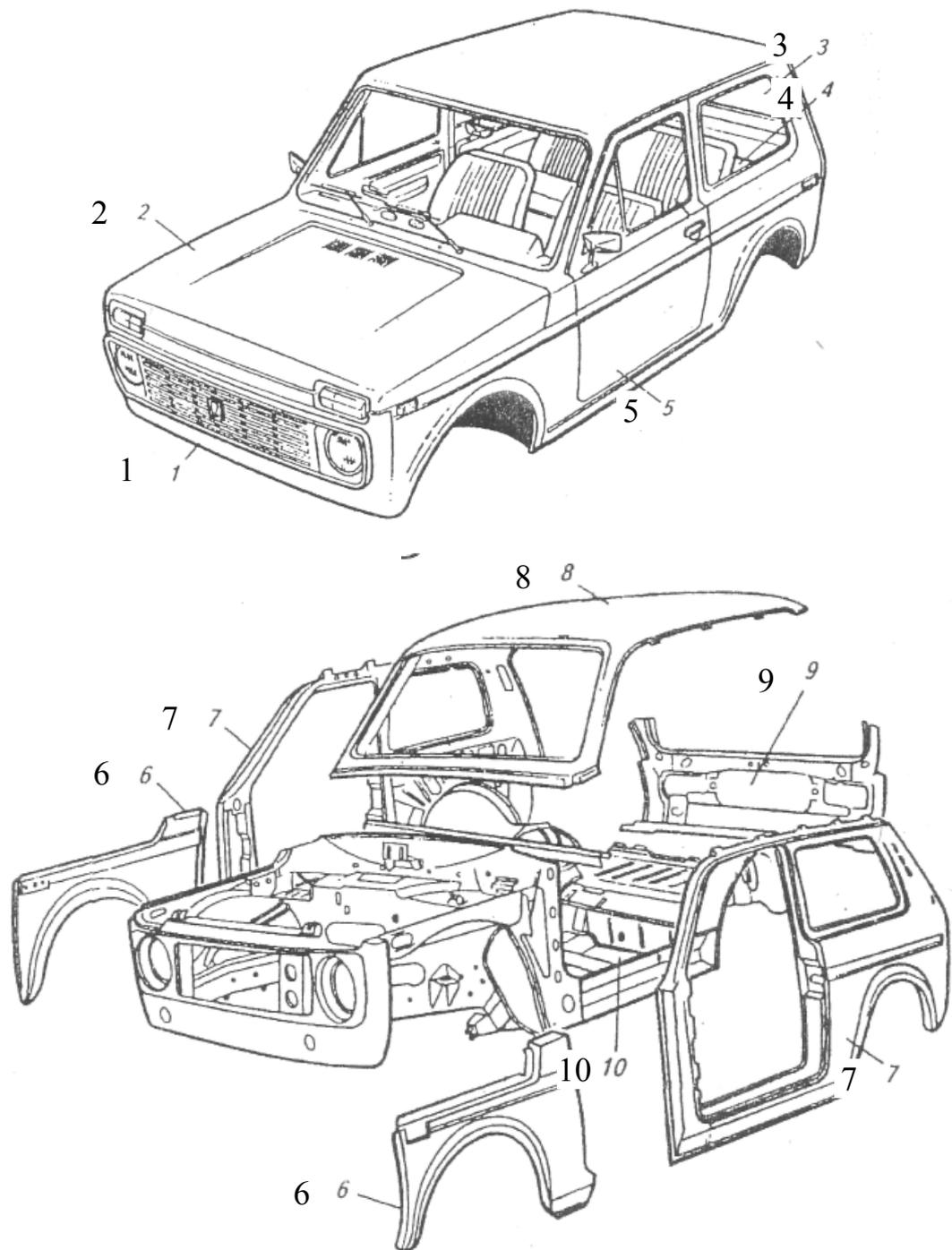


Рис. 8.5. Кузов автомобиля «ВАЗ-2121»: 1 – корпус; 2 – капот двигателя; 3 – задняя дверь; 4 – багажное отделение; 5 – передняя дверь; 6 – переднее крыло; 7 – боковина; 8 – крыша; 9 – задняя часть корпуса; 10 – основание

Комбинированные способы получения заготовок широко применяются в автомобилестроении и позволяют изготавливать конструкции повышенной прочности и жесткости. Цельносварные рамы для сверхтяжелых самосвалов изготавливают соединением прокатанных профилей электродуговой сваркой (рис. 8.3).

В автомобилестроении применяются комбинированные конструкции, часто изготовленные из листоштампованных заготовок. Для соединения та-

ких заготовок используют все виды контактной электросварки. На [рис. 8.4, а](#) показана шовная сварка бензобака. На [рис. 8.5](#) показан кузов легкового автомобиля, полученный соединением штампованных заготовок точечной контактной сваркой (количество точек колеблется от 6000–10000). Точечная сварка применяется для изготовления обечаек и корпусов в тракторостроении, приборостроении и др.

ГЛАВА 9. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

9.1. Порошковая металлургия

Порошковой металлургией называется область техники, охватывающая совокупность методов изготовления: порошков металлов и сплавов, полуфабрикатов и изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками.

Технологический процесс производства изделий методом порошковой металлургии состоит из следующих основных операций: получение металлического порошка или смеси порошков разнородных материалов, формование, спекание и дополнительная обработка спеченных порошковых изделий (механическая обработка, калибровка, термическая и химико-термическая обработка и др.). Однако в производственной практике нередко встречаются отклонения от этой совокупности элементов технологии. Например, процессы формования и спекания можно совместить в одной операции. При этом использование порошкообразного вещества в качестве исходного и применение нагрева до температур ниже точки плавления основного компонента смеси остаются неизменными в любом из вариантов технологии порошковой металлургии.

Основные направления развития порошковой металлургии связаны прежде всего с преодолением затруднений в осуществлении процесса литья тугоплавких редких металлов (вольфрам, молибден, тантал и др.) и с возможностями производства порошковых материалов и изделий со специфическими свойствами, не достижимыми другими технологическими способами, например получение композитов типа: вольфрам – медь, твердых сплавов, пористых подшипников, фильтров и пр.

Метод порошковой металлургии позволяет изготавливать многие изделия (например, детали машин и приборов) из обычных материалов и с обычными свойствами, но с лучшими технико-экономическими показателями производства по сравнению с изделиями, полученными традиционной технологией. При изготовлении изделий методом порошковой металлургии потери материалов составляют до 5–7 %, а при металлообработке литья и даже проката в стружку теряется до 60–70 %.

Наконец, важным направлением порошковой металлургии является производство металлических порошков, предназначенных для непосредственного использования (краски, пиротехнические взрывчатые смеси, катализаторы, сварочные материалы и др.), в том числе для упрочнения и защиты от коррозии деталей машин и приборов методами напыления.

Метод получения порошков и природа материала определяют свойства порошков:

химические (содержание компонентов, примесей и загрязнений, пирофорность и токсичность);

физические (форма, размер, удельная поверхность, истинная плотность и микротвердость частиц);

технологические (насыпная плотность, текучесть, формуемость и прессуемость порошка).

В некоторых случаях необходимо знание и более специфических свойств порошка, например цвета, блеска, кроющей способности красителя из него и пр.

Очень часто некоторые свойства порошка одного и того же металла существенно изменяются в зависимости от метода производства. Порошки, идентичные по химическому составу, могут иметь разные физические характеристики и резко различаться по технологическим свойствам, что приводит к значительным изменениям условий дальнейшего превращения порошка в готовые изделия и влияет на их свойства.

9.1.1. Методы получения порошков

Разнообразие требований, предъявляемых к порошкам в зависимости от области их применения, а также свойства самих металлов объясняют существование большого числа различных методов производства металлических порошков. Общепринятым является условное деление этих методов на физико-химические и механические.

К физико-химическим методам относят технологические процессы производства порошков, связанные с глубокими физико-химическими превращениями исходного сырья. В результате получаемый порошок по химическому составу и структуре существенно отличается от исходного материала. Основными являются методы восстановления металлов, электролиз и термическая диссоциация карбониллов.

Механические методы обеспечивают превращение исходного материала в порошок без существенного изменения его химического состава. Чаще всего используют размол твердых материалов в мельницах различных конструкций и диспергирование расплавов.

Физико-химические способы получения порошков в целом более универсальны, чем механические. Возможность использования дешевого сырья (отходы производства в виде окалина, оксидов и т. д.) делает многие физико-химические способы экономичными. Порошки ряда тугоплавких металлов, а также порошки сплавов и соединений на их основе могут быть получены только физико-химическими способами.

Выбирая метод получения металлического порошка, учитывают прежде всего необходимость обеспечения требований, предъявляемых к конечной продукции из него, а также экономическую оценку соответствующих технологических процессов – себестоимость порошка, размер капиталовложений, стоимость дальнейшей переработки порошка в изделия.

9.1. Порошковая металлургия

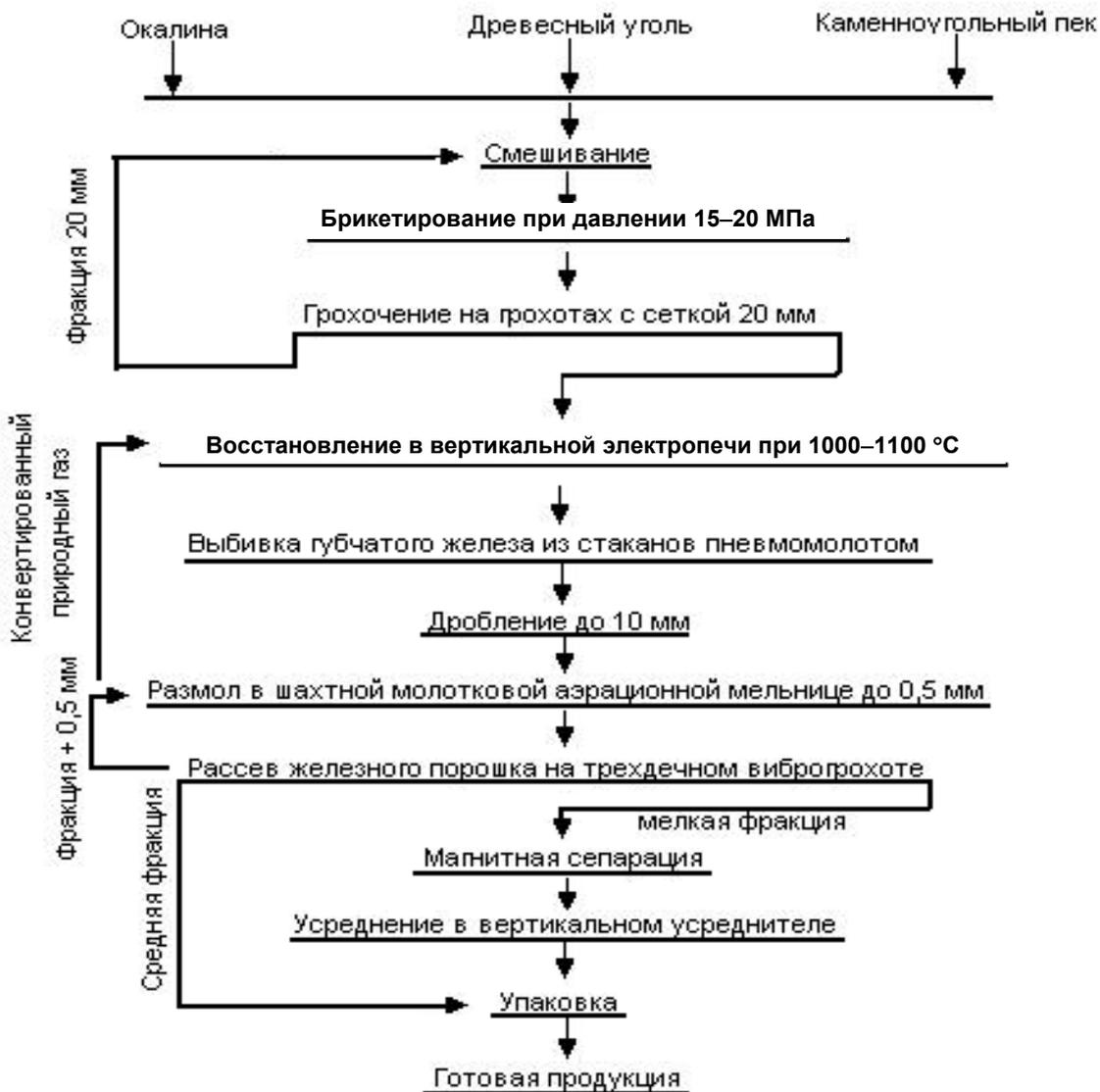


Рис. 9.1. Разновидность технологической схемы получения железного порошка методом восстановления окалина

Механические методы получения порошков могут применяться как самостоятельные, а также входить в схему производства порошка физико-химическими методами ([рис. 9.1](#)).

Диспергирование расплавов – это способ получения металлического порошка распылением расплавленного металла или сплава струей сжатого газа, жидкости или механическим путем.

Распылением получают порошки железа, сталей, чистых металлов, в том числе легких и тугоплавких, а также сплавов на их основе.

Распыление эффективно для получения порошков многокомпонентных сплавов и обеспечивает объемную равномерность химического состава, оптимальное строение и тонкую структуру каждой частицы. Методы диспергирования позволяют увеличить выпуск порошков с контролируемыми свойствами.

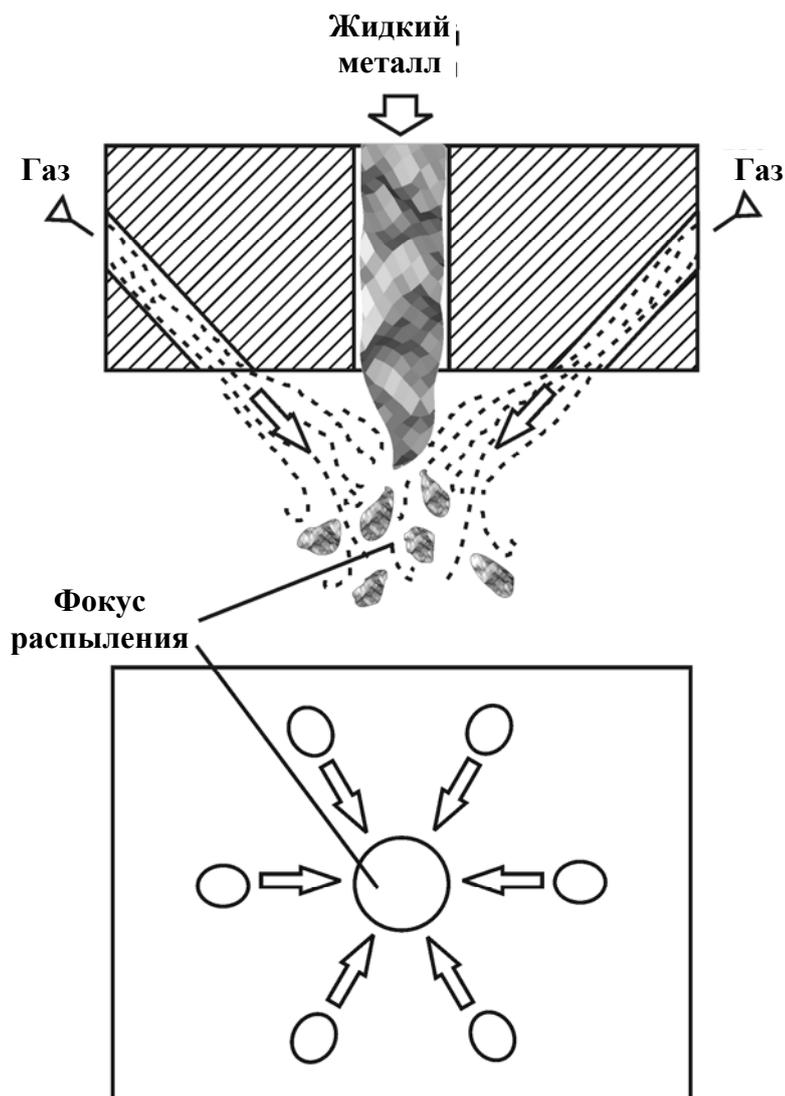


Рис. 9.2. Распыление жидкого сплава инертным газом

Одним из распространенных способов распыления для многотоннажного получения порошков быстрорежущих сталей является диспергирование газом (аргоном, гелием или азотом). Схема с вертикальным расположением форсунки, где на струю расплавленного металла под углами 60° направлены потоки подогретого газа с дозвуковой и сверхзвуковой скоростью, представлена на [рис. 9.2](#).

Полученные порошки подвергаются восстановительному отжигу.

Механические способы получения порошков, основанные на измельчении твердых тел, часто совмещают с приготовлением смесей порошков.

Из методов измельчения наибольшее распространение получили:

- обработка металлов резанием с образованием мелкой стружки или опилок;
- измельчение металлов в паровых, вихревых, центробежных, молотковых и других мельницах.

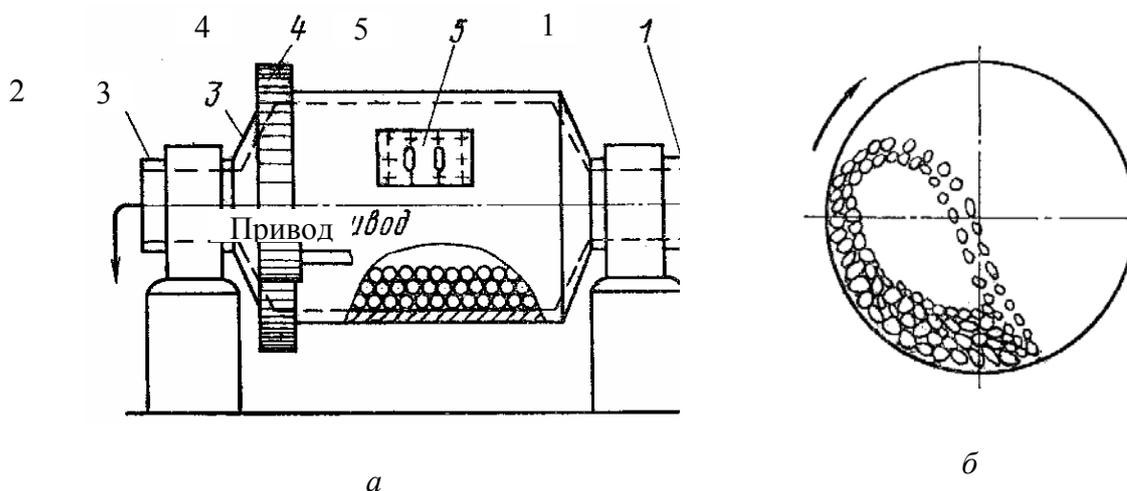


Рис. 9.3. Барабанная шаровая мельница: *а* – схема устройства; *б* – схема перемещения размольных тел и измельчаемого материала

Одним из наиболее распространенных видов размольного оборудования являются барабанные мельницы. В простейшем конструктивном варианте такая мельница представляет собой вращающийся вокруг горизонтальной оси барабан, внутри которого находится измельчаемый материал и мелющие тела ([рис. 9.3, а](#)). Мелющие тела чаще всего имеют форму шара и изготовлены из стали.

Процессы, происходящие в рабочем объеме барабанных мельниц, сводятся к следующему: мелющие тела поднимаются на некоторую высоту в направлении вращения барабана, до тех пор пока угол подъема не превысит угол естественного откоса, после чего шары скатываются или падают вниз и измельчают материал, истирая и раздалбливая его.

Измельчение может быть мокрым и сухим. Считается, что мокрое измельчение более эффективно и улучшает экологические характеристики оборудования.

9.1.2. Формообразование заготовок

Прессование изделий из порошков начинается с приготовления смеси и включает предварительный отжиг, сортировку порошка по размерам частиц и смешение порошков разного состава.

Предварительный отжиг порошка способствует восстановлению оксидов и снимает наклеп, возникающий при механическом измельчении исходного материала.

В металлические порошки вводят технологические присадочные материалы различного назначения: пластификаторы (парафин, стеарин, олеиновая кислота и др.), облегчающие процесс прессования и способствующие получению заготовок высокого качества; легкоплавкие материалы, улучшающие процесс спекания; летучие вещества, обеспечивающие получение заданной пористости.

Заготовки из металлических порошков получают прессованием (холодным, горячим, гидростатическим), прокаткой и др.

Холодное прессование. При холодном прессовании в закрытых пресс-формах (рис. 9.4, *a*) определенное количество подготовленного порошка 3 засыпают в пресс-форму 2 и прессуют пуансоном 1.

Порошковые металлы, в отличие от металлов, полученных традиционными методами, при деформации изменяют не только форму, но и объем. Обычно при формовании высота заготовки по отношению к высоте насыпанного порошка уменьшается в 3–4 раза и более.

Прочность получаемой заготовки обеспечивается в основном силами механического сцепления частиц порошка. С увеличением давления прессования прочность заготовки возрастает. Давление распределяется неравномерно по высоте прессуемой заготовки вследствие влияния трения порошка о стенки пресс-формы, в результате чего заготовки получаются с различной прочностью и пористостью по высоте.

В зависимости от размеров и сложности прессуемых заготовок применяют одно- и двустороннее прессование. Односторонним прессованием (рис. 9.4, *a*) получают заготовки простой формы с отношением высоты к диаметру меньше единицы и заготовки типа втулок с отношением наружного диаметра к толщине стенки меньше трех. Двустороннее прессование (рис. 9.4, *б*) применяют для формообразования заготовок сложной формы. В этом случае требуемое давление для получения равномерной плотности снижается на 30–40 %. Давление прессования зависит от требуемой плотности, формы прессуемой заготовки, вида прессуемого порошка и других факторов. Использование вибрационного прессования позволяет в десятки раз уменьшить необходимое давление.

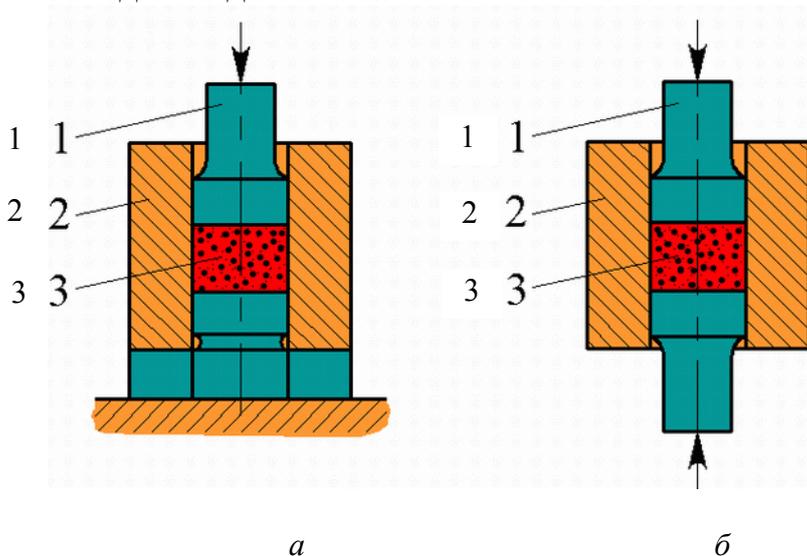


Рис. 9.4. Схемы одностороннего (*a*) и двустороннего (*б*) холодного прессования:

1 – пуансон; 2 – пресс-форма; 3 – порошок

В процессе прессования частицы порошка подвергаются упругим и пластическим деформациям, в результате чего в заготовке накапливаются

значительные напряжения. После извлечения из пресс-формы заготовки, размеры ее изменяются за счет упругого последствия.

Горячее прессование. При горячем прессовании технологически совмещаются процессы формообразования и спекания заготовки. Температура горячего прессования составляет обычно 0,6–0,8 температуры плавления порошка. Благодаря нагреву пресс-формы или порошка в ней процесс уплотнения протекает гораздо интенсивнее, чем при холодном прессовании. Это позволяет значительно уменьшить необходимое давление прессования. Горячим прессованием получают материалы, характеризующиеся высокой прочностью, плотностью и однородностью структуры. Этот метод применяют для таких плохо прессуемых и плохо спекаемых композиций, как тугоплавкие металлоподобные соединения (карбиды, бориды и т. д.). Малая стойкость пресс-форм, необходимость проведения процесса в среде защитных газов ограничивают применение горячего прессования и обуславливают его использование только в тех случаях, когда другие методы порошковой металлургии не обеспечивают заданных эксплуатационных свойств.

Пресс-формы стоят дорого, поэтому изготовление прессовок в них является экономически целесообразным в условиях крупносерийного массового производства (как правило, изготовление деталей массой до 1 кг), когда стоимость пресс-форм и технического оборудования окупается.

Гидростатическое прессование применяют для получения металлокерамических заготовок, к которым не предъявляют высоких требований по точности. Сущность процесса заключается в том, что порошок 6 ([рис. 9.5](#)), заключенный в эластичную оболочку 5, подвергают равномерному и всестороннему обжатию в специальных герметизированных камерах. Отсутствие внешнего трения способствует получению заготовок равномерной плотности и снижению требуемого давления. В качестве рабочей жидкости 4 используют масло, воду, глицерин и др.

Гидростатическое формование металлических порошков наиболее широко применяют при изготовлении изделий и заготовок, которые в дальнейшем идут на обработку давлением. С развитием реактивной авиации и ракетной техники возникла необходимость получения крупных поковок и листов из тугоплавких металлов и их сплавов. Задача получения крупных (заготовок равномерной плотности) была решена с помощью гидростатического формования.

Прокатка металлических порошков, т. е. их непрерывное формование, является одним из перспективных способов порошковой металлургии, что объясняется рядом преимуществ этого метода. Прокаткой можно получить однородные по плотности изделия большой площади, любых размеров по длине, сравнительно большие по ширине при очень малой толщине. При этом не требуется мощного прессового оборудования, как это имеет место при обычных методах формования. При прокатке порошков резко возрастают

9.1. Порошковая металлургия

производительность и экономичность процесса, поскольку не требуется больших капитальных затрат на литейные цеха и цеха горячей прокатки слитков, значительно сокращается число технологических операций и повышается выход годной продукции.

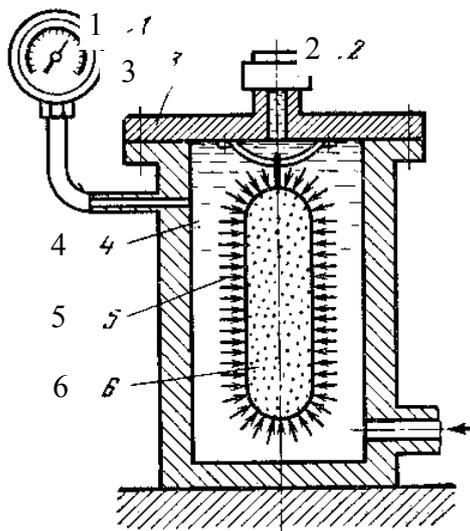


Рис. 9.5. Схема установки гидростатического формования:
 1 – манометр; 2 – предохранительный клапан; 3 – крышка; 4 – жидкость;
 5 – эластичная оболочка; 6 – деформируемый порошок

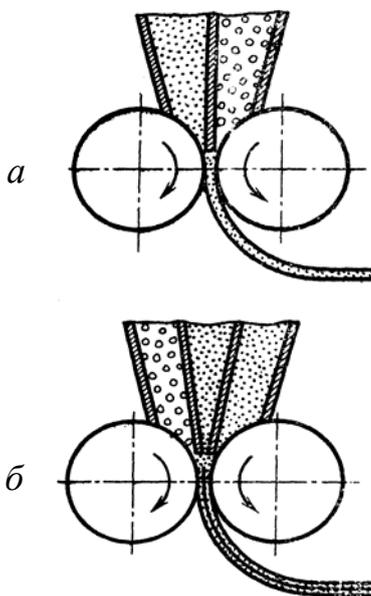


Рис. 9.6. Методы прокатки порошков: а – двухслойной; б – трехслойной

Метод прокатки металлических порошков (рис. 9.6) состоит в следующем. Подготовленная шихта засыпается в бункер, откуда поступает в зазор между вращающимися навстречу друг другу вальцами. Металлический порошок, продвигаясь в очаге деформации – области, ограниченной упорами бункера и частью поверхности валков, уплотняется и формируется в ленту. Выходя из валков, лента попадает на направляющую, откуда поступает в

печь на спекание или сматывается в рулон. Таким образом, процесс прокатки можно рассматривать как непрерывное формование с постепенным уплотнением от сыпучего состояния материала до жесткого пористого тела.

Для повышения плотности и улучшения механических свойств спеченную ленту подвергают дальнейшей многократной холодной прокатке с промежуточными отжигами. После этих операций лента по своим свойствам не отличается от полученной из слитков. Порошковую ленту можно прокатывать в вертикальном и горизонтальном направлениях в зависимости от расположения прокатных лент.

Прокаткой порошка можно получать биметаллические и многослойные ленты и полосы. Для получения биметаллической ленты в бункер вставляется перегородка, которая нижним срезом доходит до зоны деформации и разделяет подаваемые порошки (рис. 9.6, а). Аналогичным способом можно получать и многослойные ленты. В этом случае в бункер устанавливаются несколько перегородок по числу слоев ленты (рис. 9.6, б). Немного отличается от этой методики получение биметаллической ленты из компактного металла и порошкового слоя. В этом случае прокатка порошка проводится совместно с компактной подложкой. После прокатки заготовка спекается или подвергается дополнительной горячей прокатке. Так изготавливают тормозные стальные ленты, с фрикционным металлокерамическим слоем.

Прокаткой порошков можно получать не только листы и ленту, но и простейшие профили: прутки, проволоку и т. д.

9.1.3. Спекание

При спекании увеличивается поверхность контакта частиц, а также плотность материала и его прочность.

Температура спекания зависит не только от химического состава прессовки, но и от фракции порошка. В прессовках из тонких порошков частицы имеют большую внутреннюю и внешнюю (в связи с пористостью) поверхность, температуры спекания таких прессовок ниже, чем температуры спекания прессовок из порошков более крупной фракции того же состава.

Твердофазное спекание однокомпонентных прессовок производится при температуре около 0,7–0,9 их абсолютной температуры плавления. В начальной стадии спекания (рис. 9.7, а) снимаются наклеп и остаточные напряжения (возникшие при прессовании), что сопровождается ослаблением физического контакта между частицами, при этом относительная плотность остается практически неизменной (рис. 9.7, б). По достижении температуры, составляющей примерно половину температуры плавления, развиваются процессы восстановления оксидов и удаления из прессовки газообразных продуктов; снижение или повышение плотности на этом этапе зависит от начального количества оксидов и характера порообразования, препятствующего (при закрытых порах) или способствующего (при открытых порах) удалению газов. На последнем – высокотемпературном – этапе спекания идет

диффузионная рекристаллизация с полным развитием металлических контактов, что сопровождается уплотнением материала (рис. 9.7, в, з).

Твердофазное спекание двух- и многокомпонентных прессовок производится при температуре несколько ниже точки плавления наиболее низкоплавкого компонента в порошковой смеси.

Жидкофазное спекание многокомпонентных прессовок производится при нагреве несколько выше температуры плавления самого легкоплавкого компонента, вводимого в смесь порошков в качестве связующего, или точки плавления эвтектики этого компонента с другими компонентами порошковой смеси. От взаимной растворимости компонентов и их способности образовывать химические соединения зависит, будет полученный после спекания материал однофазным или многофазным.

Прессовки имеют, как правило, большую удельную поверхность и склонность к окислению, поэтому спекание производят чаще в нейтральной или восстановительной среде (вакуум, угольные засыпки, водород, азот).

Если на поверхности частиц находятся оксиды, не восстанавливающиеся водородом, то в шихту вводят сжатый углерод, восстанавливающий при нагреве металлы из оксидов (оксиды титана, магния, хрома, тантала, ниобия).

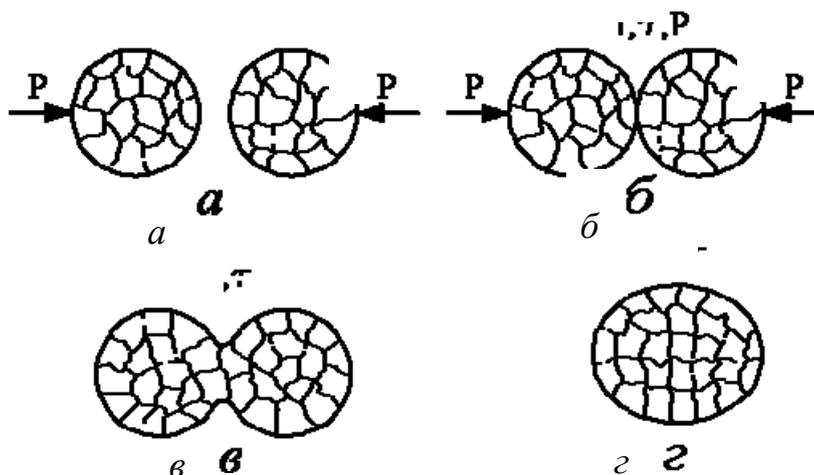


Рис. 9.7. Схема объединения структурных элементов порошковой заготовки при уплотнении и спекании: а – сближение; б – соприкосновение; в – начало объединения; г – полное объединение заготовок

Для спекания при температурах до 1100 °С применяют электрические печи сопротивления с нихромовыми элементами, при температурах до 1500 °С – с молибденовыми элементами, до 2500 °С – с вольфрамовыми элементами. Для спекания при более высоких температурах применяют высокочастотный нагрев или пропускают через заготовку электрический ток.

Температура спекания изделий конструкционного назначения из порошков на основе железа – 1100–1200 °С, на основе меди – 800–950 °С.

Спеченные материалы можно подвергать ковке, прокатке, штамповке при повышенных температурах. Обработка давлением позволяет снизить

пористость материалов и повысить их пластичность. Например, у спеченных заготовок вольфрама с исходной пористостью 38–40 % послековки пористость снижается до 2–5 % и металл приобретает пластичность, необходимую для протяжки через фильеры или прокатки. Для снятия напряжений перед прокаткой заготовки из вольфрама подвергают промежуточному отжигу при температурах выше 1200 °С. После протяжки вольфрама в проволоку диаметром 0,05 мм пористость его снижается до 1 %.

9.1.4. Изделия из порошковых композиционных материалов

Изделия из металлокерамических твердых сплавов – пластинки к режущему инструменту, к инструменту для буров при бурении горных пород, а также фильеры для волочения. Некоторые мелкие режущие инструменты (сверла, развертки, фрезы) изготавливают целиком из твердых сплавов.

Металлокерамические твердые сплавы очень тверды (82–92 HRA) и способны сохранять режущую способность до температур 1000–1100 °С. Основной составляющей таких сплавов являются карбиды вольфрама, титана, тантала. В качестве связующего применяют кобальт.

Антифрикционные и фрикционные изделия. Антифрикционные сплавы содержат дефицитные цветные металлы (олово, свинец, сурьма). Такие сплавы не могут работать в условиях сухого трения, при большой скорости скольжения, в агрессивных средах и при температурах выше 350 °С.

Для изготовления подшипников скольжения, вкладышей, втулок, уплотнителей все более широкое применение находят спеченные антифрикционные материалы, которые могут работать в названных выше условиях. Эти материалы характеризуются также низким коэффициентом трения, высокой износоустойчивостью и хорошей прирабатываемостью. Относительная пористость этих материалов (18–25 %) обеспечивает необходимую маслоспособность; для пропитки маслом изделия обрабатывают в масляной ванне при температуре 100–120 °С.

Спеченными антифрикционными материалами являются железографит, железографит-медь, железомедь, бронзографит.

Фрикционные спеченные материалы применяют для прокладок в тормозных дисках машин, для тормозных лент и колодок в самолетах, тракторах и т. д. В состав их входят медь, железо, олово, графит, кремний. Эти материалы выдерживают давление до 7 МПа и нагрев до температуры 550 °С.

Фильтры, спеченные из порошков металлов и металлоподобных соединений, по сравнению с фильтрами из других материалов (из бумаги, фибры, фетра, металлической проволоки, фторопластовых и нейлоновых пористых материалов), имеют большие прочность и стабильность формы, теплостойкость и теплопроводность, а также способность регенерироваться в

процессе работы. Различные фильтры задерживают частицы размером от 10 до 1 мкм.

Фильтры изготавливают из порошков железа, стали, бронзы, титана. Они могут иметь форму лент, труб, стаканов.

Получение спеченных изделий включает калибровку и окончательную термическую обработку.

Традиционно для получения деталей используют порошки с размерами частиц от 400 до 20 мкм. Для некоторых специальных изделий необходимы тонкие порошки с частицами от 2 до 0,1 мкм. Это обуславливает переход от механических способов получения порошков к химическим и электрохимическим методам (восстановление в газовой и жидкой фазах, электролиз).

9.1.5. Проектирование технологичных заготовок

При проектировании порошковых деталей следует максимально уменьшать количество изменений толщины или диаметра заготовки вдоль оси, если это не противоречит конструктивной необходимости (поз. 1 на [рис. 9.8](#)). Толщина стенки изделия диаметром 10–15 мм и высотой 15–20 мм должна быть не менее 1,2–1,5 мм. У более крупных заготовок минимальная толщина стенки возрастает примерно по 0,8 мм на каждые 25 мм длины. Толщина данной части глухих отверстий должна быть не менее 2–3 мм. Отверстия располагаются на расстоянии не менее 2–3 мм от края заготовки и друг от друга.

В конструкциях изделий *следует избегать*:

- резких изменений толщины стенок (поз. 2 на [рис. 9.8](#));
- узких и длинных выступов (поз. 3 на [рис. 9.8](#)) и выемок (поз. 4 на [рис. 9.8](#)); обратной конусности (поз. 5 на [рис. 9.8](#));
- острых углов (поз. 6 на [рис. 9.8](#)) и других форм, приводящих к ослаблению пресс-форм;
- радиальных канавок (поз. 8 на [рис. 9.8](#)), выемок и отверстий, расположенных перпендикулярно к оси прессования (поз. 9 на [рис. 9.8](#)).

При сопряжении поверхностей следует предусмотреть радиус закругления не менее 0,25 мм для внутренних и не менее 2,5 мм для наружных поверхностей. Рекомендуется заменить фигурные отверстия в деталях круглыми (поз. 7 на [рис. 9.8](#)), что упрощает конструкцию пресс-формы.

9.1. Порошковая металлургия

С усложнением формы прессуемой заготовки затрудняется достижение равномерной плотности во всех ее частях. При изготовлении таких заготовок приходится применять разрезные матрицы. Применение пресс-форм с двумя и более плоскостями разъема оправдано лишь в исключительных случаях, так как это резко увеличивает стоимость пресс-форм и снижает производительность труда. В некоторых случаях части фасонного изделия формируют отдельно, а затем их спекают в одно целое.

Заготовки, получаемые холодным прессованием с последующим спеканием, должны иметь:

- точность размеров некалиброванных деталей 8–14-го качества, калиброванных – 6–7-го качества;
- шероховатость поверхности некалиброванных деталей – Ra 2,5–0,63 мкм, калиброванных – Ra 0,32–0,08 мкм.

Экономическая эффективность изготовления порошковых заготовок тем выше, чем больше их серийность. Поэтому такая технология целесообразна только при годовой программе выпуска в несколько тысяч штук.

Коэффициент использования металла при изготовлении порошковых деталей может достигать 90–98 %, а, например, наличие в материале подшипника пор, пропитанных смазочными жидкостями, увеличивает его срок службы в 1,5 раза и более.

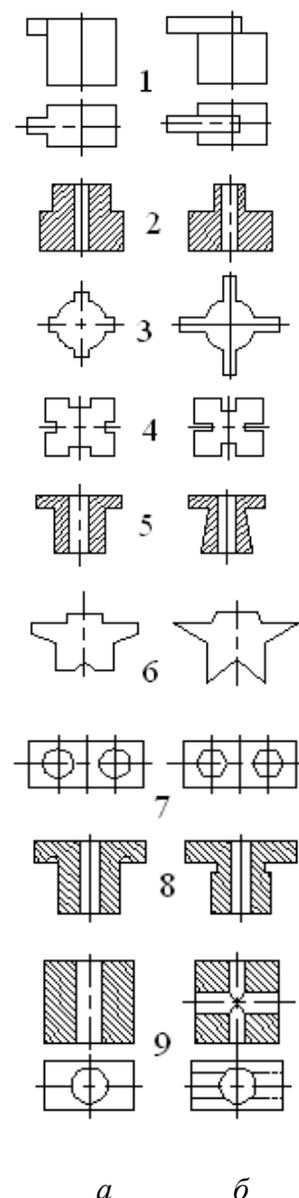


Рис. 9.8. Примеры конструкций порошковых заготовок:
а – технологичных;
б – нетехнологичных

9.2. Способы формования изделий из пластмасс

Специфические физические и технологические свойства пластмасс определяют своеобразные методы их переработки в полуфабрикаты и изделия. Из полимерных материалов изготавливают зерна, нити, пленки, трубы и самые разнообразные изделия сложной формы. Выбор метода изготовления изделия определяется видом полимера, его исходным состоянием, а также формой и размерами изделия.

Экструзия состоит в выдавливании расплава полимера через мундштук с отверстием, сечение которого определяется формой изделия. При обработке методом экструзии получают стержни, трубы, листы и пленки из термопластов (реже из реактопластов), а также из резиновых смесей (в резиновом производстве экструзию чаще называют шприцеванием).

На [рис. 9.9](#) приведена схема работы экструдера. Порошкообразный или гранулированный полимер (или смесь сырой резины) засыпают в бункер, откуда он попадает на шнек 4 (вращающийся от электродвигателя винтовой ротор), который перемещает полимер в осевом направлении своими винтовыми поверхностями (как в мясорубке); при вращении шнека сжатие материала происходит вследствие уменьшения шага винта или глубины винтовой канавки. Перемещаемый в цилиндрическом кожухе питателя сыпучий материал проходит зону обогрева 3 с температурой от 100 до 400 °С в зависимости от обрабатываемого полимера. Расплав полимера концом шнека выталкивается в головку с мундштуком 2. Форма профиля фиксируется в результате охлаждения (термопласты), соединения функциональных групп (реактопласты) или вулканизации (резиновые смеси). При необходимости отверстия в изделиях образуются дорном 5. Полученное изделие 1 подхватывается транспортером 6.

Методом экструзии получают основную массу изделий из термопластов, резины и эбонита. Этот метод применяется также для получения некоторых видов изделий из термореактивных смол и композиций.

Метод раздувки применяют при изготовлении пустотелых изделий ([рис. 9.10](#)) и пленок.

Заготовка из термопласта в виде трубки 1 помещается между полуформами 3 ([рис. 9.10, а](#)). Формы смыкают и подают сжатый воздух через головку экструдера 2 ([рис. 9.10, б](#)). Сжатый воздух придает изделию 5 ([рис. 9.10, в](#)) нужную конфигурацию, которая фиксируется с помощью холодного воздуха, подаваемого по каналам 4.

Пленки и другие изделия из некоторых термопластов (полиэтилена, поливинилхлорида, полистирола, целлулоида) получают при раздувании труб.

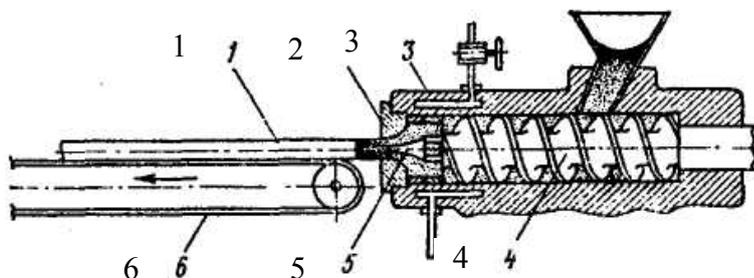


Рис. 9.9. Горизонтальный экструдер: 1 – изделие; 2 – мундштук; 3 – нагреватель; 4 – шнек; 5 – дорн (оправка); 6 – транспортер

9.2. Способы формования изделий из пластмасс

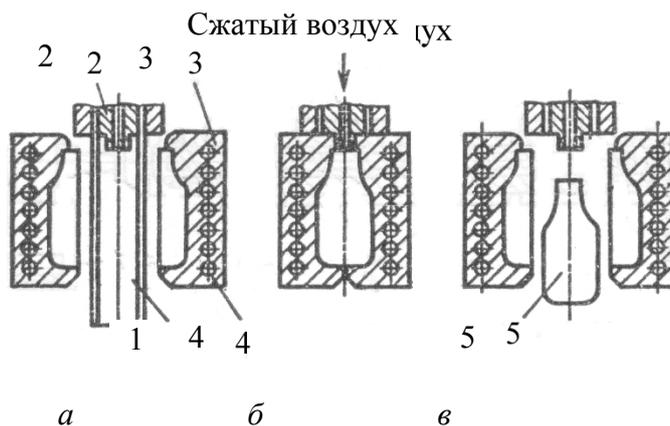


Рис. 9.10. Схема раздувки полых изделий: *а* – форма разомкнута; *б* – подача воздуха в форму; *в* – извлечение изделия

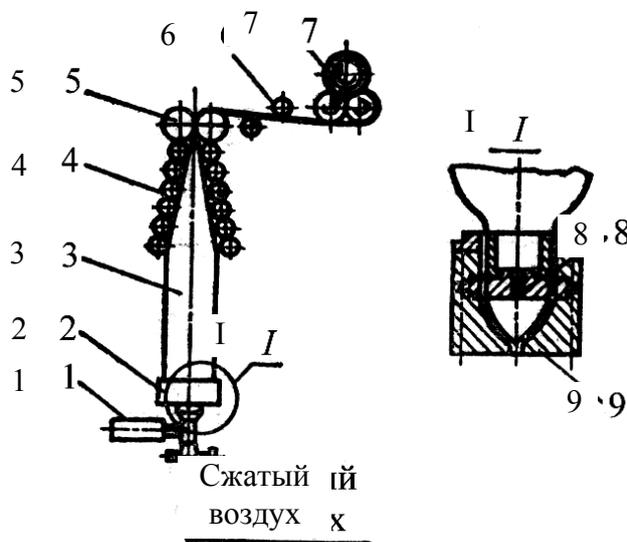


Рис. 9.11. Схема получения пленки методом раздувки: *1* – экструдер; *2* – формующая головка; *3* – рукав пленки; *4, 6* – направляющие ролики; *5* – тянущие ролики; *7* – рулон с пленкой; *8* – дорн (канал для подачи сжатого воздуха); *9* – канал для подачи расплавленного полимера

Схема получения пленки методом раздувки представлена на [рис. 9.11](#). Термопласт из рабочего цилиндра *1* экструзионной машины поступает в головку *2* и выдавливается через кольцеобразную щель *9*, составленную мунштуком и дорном *8*, в результате чего получается труба. Эта труба раздувается воздухом, поступающим к головке *2* по магистрали через дорн *8*; пленка проходит холодильник, обдувающий ее снаружи холодным воздухом, а затем между направляющими роликами *4, 6* и через тянущие ролики *5*, которыми трубчатая пленка складывается в плоский рукав. При надобности рукав срезается по краям, и тогда пленка наматывается рулоном *7* в виде двойной ленты шириной до 1400 мм. Давление воздуха внутри пузыря для получения рукава данного диаметра (а следовательно, и толщины пленки) остается постоянным. Изменение давления определяет соответствующее уменьшение или увеличение диаметра рукава.

Прессование пластмасс производят на гидравлических этажных прессах и в закрытых пресс-формах.

Прессование на этажных прессах применяют для получения листов и плит из ПВХ и слоистых фенопластов. Пленки термопластов или листы наполнителей, пропитанных термореактивной смолой, помещают в этажный гидравлический пресс между стальными плитами 1 (рис. 9.12), имеющими внутренние каналы для проточной воды или пара. Технологический режим прессования (температура, давление, продолжительность выдержки) зависит от вида полимера, толщины прессуемого изделия, вида и количества наполнителей.

Прессование в закрытых пресс-формах делится на обычное и литьевое. *Обычное прессование* реактопластов (рис. 9.13) бывает горячим и холодным; оно требует весьма точной дозировки загружаемого пресс-материала, так как лишь очень незначительное количество его выдавливается между пуансоном 1 и матрицей 3. Излишки материала, выдавленные из матрицы при получении изделия 2, называют *гротом* или *облоем*.

Горячее прессование имеет большее распространение. Для прессования композицию (в виде гранул или ткани, пропитанной смолой) помещают в нагретую пресс-форму, где она разогревается и становится пластичной. При постепенном смыкании пресс-формы пресс-композиция заполняет все ее углубления и полости. Изделия выдерживают под давлением до отверждения. Часто пресс-композицию перед загрузкой в форму подогревают до температуры 80–150 °С (особенно при больших сечениях изделия): это обеспечивает повышение производительности и дает возможность снизить давление при прессовании. Подогрев производят токами высокой частоты, обеспечивающими выделение тепла внутри материала. Пресс-форму нагревают паром, газом, перегретой водой или электрическим током до 135–160 °С; давление при горячем прессовании – 10–55 МПа.

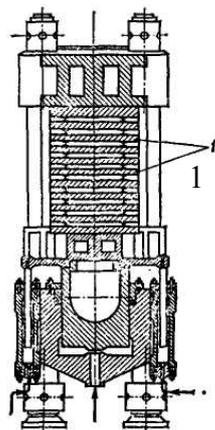


Рис. 9.12. Схема гидравлического этажного пресса: 1 – стальные плиты

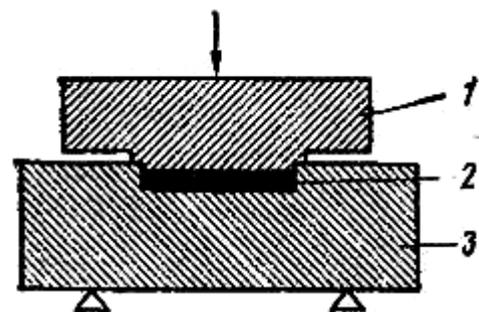


Рис. 9.13. Схема прессования в закрытых пресс-формах: 1 – пуансон; 2 – изделие; 3 – матрица

Методом горячего прессования перерабатывают в основном композицию на основе фенолоальдегидных смол и аминопласты, а также армирован-

ные полиэфирные пластики. Горячее прессование применяют для изготовления изделий глубокой вытяжкой (корпуса видео- и аудиотехники, телефонных аппаратов и т. п.), а также мелких изделий при массовом производстве (пуговицы, пряжки).

Холодное прессование отличается высокой производительностью, так как при этом не требуется ни нагрева, ни охлаждения пресс-формы. Холодное прессование производят при давлении 14–210 МПа. После прессования изделия нагревают в печах до температуры 80–260 °С в зависимости от связующего.

Метод холодного прессования применяют при переработке асфальто-печковых пластмасс (для получения баков аккумуляторных батарей и т. п.), композиций на основе фенолоальдегидных смол для получения электротехнических деталей (патроны электроламп, корпуса выключателей, штепсельных розеток).

При литьевом прессовании пресс-композиция помещается в загрузочную камеру 5 (рис. 9.14), где она нагревается до вязкотекучего состояния, и оттуда выдавливается пуансоном 6 через один или несколько узких литников в полость 1 формы. Под давлением подвижной части 4 формы изделию 3 придается заданная конфигурация, после чего оно удаляется из формы выталкивателем 2.

Методом литьевого прессования получают изделия из терморезистивных смол, а также из высоковязких термопластов.

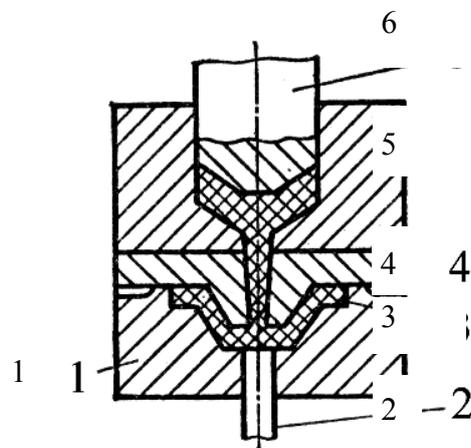


Рис. 9.14. Схема литьевого прессования: 1 – неподвижная часть формы; 2 – выталкиватель; 3 – изделие; 4 – подвижная часть формы; 5 – загрузочная камера; 6 – пуансон

Преимуществом литьевого прессования является возможность получения точных по размерам изделий весьма сложной формы (в том числе с углублениями, отверстиями и резьбой).

Штамповка пластмасс. Методом штамповки в изделия перерабатываются термопласты (винипласт, органическое стекло, полистирол, полиэтилен, полипропилен) из листовой заготовки. Формообразование изделия достигается при вытяжке нагретого листа и охлаждении изделия. Штампованные изделия сохраняют форму лишь при температурах ниже температуры стеклования, нагрев и выдержка при температурах выше температуры стеклования полимера приводят к восстановлению формы листа.

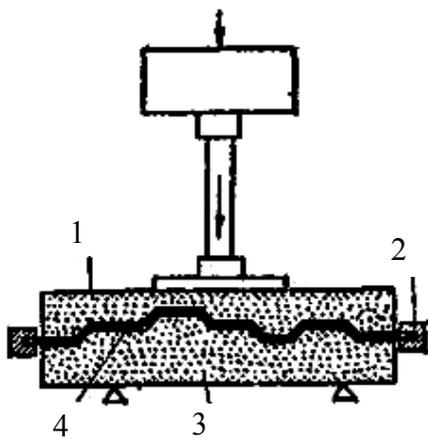


Рис. 9.15. Схема штамповки направленной вытяжкой: 1 – пуансон; 2 – зажимы; 3 – матрица; 4 – изделие

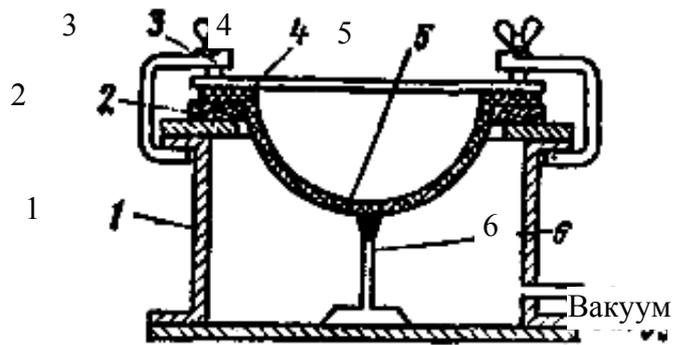


Рис. 9.16. Схема штамповки свободной вытяжкой: 1 – вакуум-камера; 2, 4 – протяжное и прижимное кольца; 3 – зажимы; 5 – заготовка; 6 – указатель

При штамповке пластмасс применяют два метода формования: направленной и свободной вытяжки.

Форма изделия *при направленной вытяжке* задается рабочими поверхностями матрицы и пуансона или только матрицы с применением давления воздуха или вакуума. На [рис. 9.15](#) приведена схема направленной вытяжки с помощью формы, состоящей из пуансона 1 и матрицы 3. Для штамповки лист термопласта закрепляется в зажимах 2. Изделие 4 остается в форме до охлаждения.

Свободную вытяжку применяют для получения крупных изделий. Вытяжка производится по вакуумному или пневматическому методу, причем изделие не трется о стенки штампа, что особенно важно для получения гладких поверхностей оптических, прозрачных изделий. На [рис. 9.16](#) приведена схема свободной вытяжки по вакуумному методу. Нагретая листовая заготовка зажимается между протяжным 2 и прижимным 4 кольцами с помощью зажимов 3. При откачивании воздуха из вакуум-камеры 1 заготовка 5 протягивается через кольцо 2. Величина вытяжки контролируется указателем 6.

Формование крупногабаритных изделий. Для изготовления из пластмасс крупногабаритных корпусных изделий (судовых корпусов, автомобильных кузовов) рассмотренные выше методы формования неприемлемы, так как требуют громоздкого и сложного оборудования. Для получения таких изделий применяют способ контактного формования и способ мешка.

По способу контактного формования ([рис. 9.17](#)) наполнитель (армирующий материал) укладывают в форму 1 и смачивают кистью или из пульверизатора жидким связующим 2 (иногда в несколько слоев). Затем компо-

зицию покрывают целлофановым листом 3 и прикатывают роликом к стенкам формы для удаления воздуха, выравнивания изделия и обеспечения тесного контакта связующего и наполнителя.

Далее идет процесс отверждения связующего (содержащего для этого отвердитель) при комнатной температуре или при некотором нагреве. В качестве армирующего наполнителя применяют стеклоткань, стекловолокно, в качестве связующего – фенольные, эпоксидные и ненасыщенные полиэфирные смолы.

При формовании *по способу мешка* (рис. 9.18) подготовка и укладка компонентов производится аналогично способу контактного формования. Применение мешка (чаще резинового) обеспечивает лучший контакт между связующим и наполнителем, а также лучшее выравнивание изделия. При наложении слоев (рис. 9.18, а) мешок 1 находится вне формы. Для формования при отверждении прижимная плита 2 прочно крепится к верхнему срезу формы, а в мешок подается воздух или пар, под давлением которого и протекает отверждение смолы (рис. 9.18, б).

Вспенивание полимеров дает ячеистые (пенистые), с несообщающимися ячейками, наполненными газами, и пористые, имеющие свободные поры (как в губке), конструкционные материалы малой объемной массы (до 0,01 г/см³).

Для вспенивания применяют фенолоальдегидные и мочевиноальдегидные смолы, полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид, ацетат целлюлозы, а также натуральный и синтетический каучуки. Из вспененных полимеров изготавливают плавсредства, тепло- и электроизоляцию, звукопоглощающие детали, губки, материалы для подушек и упаковки мебели.

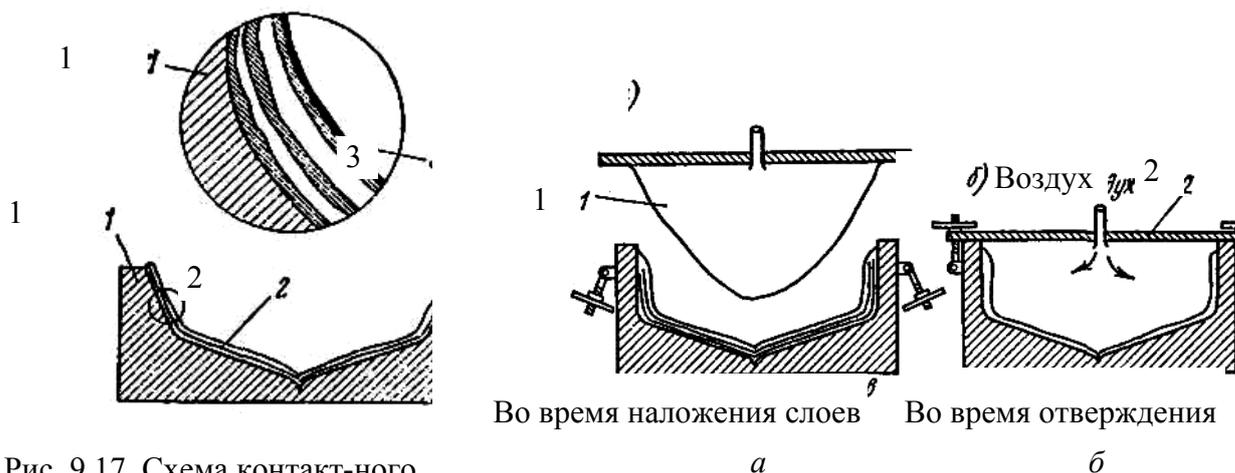


Рис. 9.17. Схема контактного формования крупнобаритных изделий: 1 – форма; 2 – слой жидкого связующего; 3 – целлофановый лист

Рис. 9.18. Схема формования по способу мешка

Сварка возможна для всех термопластов. Для сварки применяют горячий (250–300 °С) воздух, нагретый электрическим током или газовым пламенем, токи высокой частоты или ультразвук. Поверхности для сварки очищают,

выравнивают и сжимают (давление – 200–300 кПа). При нагреве в граничном слое макромолекулы переходят в пластичное состояние, приобретают подвижность, что способствует взаимной диффузии и свариванию частей.

Пластмассы, имеющие высокие диэлектрические свойства (полиэтилен, полипропилен, полиизобутилен и полистирол), не свариваются токами высокой частоты. Для сварки твердого поливинилхлорида применяют также нагрев трением, а для мягкого – нагрев паяльником, горячей лентой.

Поверхностные покрытия. Полимеры широко используют для поверхностных покрытий по металлу, дереву, бумаге, пластмассам с целью защиты от коррозии, эрозии и для декорирования. Покрытия делят на высыхающие при испарении растворителя и полимеризующиеся или окисляющиеся с образованием пленки на воздухе.

Покрытия из термопластов наносят также способом горячего напыления, при котором пластик в виде пасты или порошка пропускается через воздушно-ацетиленовое пламя. Размягченные частицы пластика попадают на защищаемую поверхность и покрывают ее сплошным ровным слоем.

Операции механической обработки пластмасс применяют преимущественно для удаления литников, облоя, заусенцев, приливов и снятия галтелей и фасок. Выполнение этих операций для реактопластов и жестких термопластов производится шлифованием электрокорундовыми кругами, а также резцами, фрезами, зенковками, причем для обработки заготовок с наполнителями, вызывающими абразивный износ (песок, стекловолокно), целесообразно использовать инструменты с твердыми сплавами, алмазом и эльбором.

Для удаления облоя используют также перфорированные шести или восьмигранные галтовочные барабаны, сделанные из листов поливинилхлорида или полиэтилена высокой прочности. Загруженные в барабан заготовки при его вращении соударяются между собой и со стенками барабана, в результате чего облой скалывается.

Доработка заготовок из эластичных полимеров производится преимущественно резцами и сверлами из быстрорежущей стали. Широкое применение для отделения литников системы имеет вырубка заготовок штампом.

Механическая обработка сверлением, точением, фрезерованием, шлифованием применяется также в тех случаях, когда прессованием или литьем под давлением не достигается необходимая точность размеров отдельных элементов изделий.

Для уменьшения шероховатости поверхности производят полирование заготовок войлочными кругами, на поверхность которых наносят пасту из смеси пемзы и воды; после мокрого полирования заготовки подвергают сухому полированию с использованием абразивной пасты из оксида хрома с парафином.

9.3. Композиционные материалы. Классификация

Композиционными материалами (КМ) называют сложные материалы, в состав которых входит сильно отличающиеся по свойствам, нерастворимые или малорастворимые один в другом компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей.

Основой КМ (матриц) служат металлы или сплавы (КМ на металлической матрице), а также полимеры, углеродные и керамические материалы (КМ на неметаллической основе).

Матрица связывает композицию, придает ей форму. В матрице равномерно распределены остальные компоненты – *упрочнители*, их часто называют *наполнителями* или *армирующими компонентами*.

Требования к матрице:

- защищать от механических повреждений и окисления;
- обеспечивать высокую прочность и жесткость.

Волокна, используемые в качестве упрочнителя, должны обладать следующими свойствами:

- высокой температурой плавления;
- малой плотностью;
- высокой прочностью во всем интервале рабочих температур;
- технологичностью, минимальной растворимостью в матрице;
- высокой химической стойкостью.

Композиционные материалы получают следующими технологическими методами:

жидкофазным методом: пропитка и направленная кристаллизация сплавов;

твердофазным методом: прокатка, экструзия, ковка, штамповка, уплотнение взрывом, диффузионная сварка и др.;

методом осаждения – напыления: матрица наносится на волокна из растворов солей или других соединений, из парогазовой фазы, из плазмы и т. п.;

комбинированным методом: последовательное или параллельное применение нескольких методов.

Композиционные материалы являются многофункциональными материалами. Тем не менее выделяют КМ:

широкого назначения (несущие конструкции, например, судов);

жаропрочные (камеры сгорания);

термостойкие (изделия, работающие в условиях теплосмен);

фрикционные (тормозные колодки);

ударопрочные (броня самолетов);

теплозащитные со специальными свойствами (магнитными, электрическими и т. д.).

В настоящее время наука и производства, связанные с разработкой новых композиционных материалов, развиваются наиболее динамично.

Специалистами разработано и исследовано огромное количество КМ. Для того чтобы систематизировать КМ по различным признакам, грамотно реализовать процедуру их выбора для изготовления различных деталей, упорядочить терминологию в области материаловедения композитов, необходима обоснованная классификация этих материалов.

Единой общепринятой классификации КМ нет. Это объясняется рядом причин. Одна из них заключается в том, что КМ представляют собой широкий класс материалов, объединяющих металлы, полимеры и керамику. Современные технологии позволяют реализовать различные, считавшиеся ранее экзотическими сочетания исходных материалов. Разнообразие исходных материалов, сложность реальных структур в ряде случаев затрудняют классификацию получаемых КМ. К тому же вызывает трудности определение понятия «композиционный материал». Ниже рассмотрено несколько подходов к классификации КМ.

Деление композитов может осуществляться по ряду признаков.

Классификация КМ по размеру и геометрии наполнителя:

- *КМ с нуль-мерными компонентами* имеют в трех измерениях очень малые размеры одного порядка (частицы) и, следовательно, не имеют ни одного размера, соизмеримого с характерным размером элементарного образца КМ. В качестве примеров композитов такого типа можно привести дисперсно-упрочненные сплавы, металлы и сплавы, армированные частицами, и материалы на основе керамики, содержащие короткие нитевидные кристаллы, длина которых много меньше размера элементарного образца КМ;

- *КМ с одномерными компонентами* содержат армирующие компоненты, один из размеров которых значительно превышает два других размера и соизмерим с характерным размером элементарного образца КМ. Примеры КМ этой группы: волокнистые КМ на основе металлов и полимеров, армированные керамическими, борными, стеклянными волокнами;

- *КМ с двумерными наполнителями* содержат компоненты, имеющие два размера, значительно превосходящих третий размер и соизмеримых с характерным размером элементарного образца КМ. Примером материалов этой группы являются слоистые КМ, состоящие из чередующихся слоев Ti и Al и их сплавов;

- *комбинированные КМ* содержат два или три компонента различной размерности. Примером такого КМ служит пластик на основе эпоксидной смолы, армированный углеродными волокнами и короткими нитевидными кристаллами карбида кремния.

Классификация КМ по расположению наполнителя, т. е. по схеме армирования:

- *КМ с одноосным (линейным) расположением армирующего компонента.* В таких КМ армирующие компоненты в виде волокон или ориентированных цепочек нитевидных кристаллов располагаются в матрице параллельно друг другу;

- *КМ с двухосным (плоскостным) расположением армирующего компонента.* Армирующие компоненты в виде волокон, фольг, матов из нитевидных кристаллов расположены в матрице в плоскостях, параллельных друг другу;

- *КМ с трехосным (объемным) расположением компонентов,* когда невозможно выделить одно или два преимущественных направления в материале.

Существуют комбинированные КМ, армированные одновременно компонентами различной геометрии.

Классификация КМ по природе компонентов (матриц и наполнителей). По данному признаку КМ делят на четыре группы:

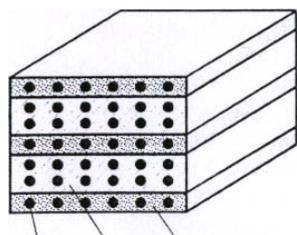
- *с компонентами из металлов и сплавов;*
- *с компонентами из неметаллических элементов (например, углерода);*
- *с компонентами из неорганических соединений (окислов, карбидов, нитридов);*
- *с компонентами из органических соединений.*

В соответствии с этим признаком КМ углерод-углерод относится:

по природе матрицы – к группе КМ с матрицей из неметаллических элементов;

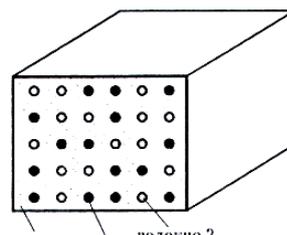
по природе армирующего компонента – к группе КМ со вторым компонентом из неметаллических элементов.

Углепластики относятся: по природе матрицы – к группе КМ с матрицей из органических соединений; по природе армирующего компонента – к группе КМ со вторым компонентом из неметаллических элементов.



Волокно Матрица 1 Матрица 2

a



Матрица Волокно 1 Волокно 2

б

Рис. 9.19. Примеры композиционных материалов:
a – полиматричные; *б* – полиармированные

Дополнениями к группам являются комбинированные композиционные материалы. Полиматричные КМ (рис. 9.19, *a*) состоят из чередующихся слоев двух или более композиций с матрицами различного химического состава. Полиармированные КМ (рис. 9.19, *б*) содержат два и более различных наполнителя.

Если КМ состоят из трех или более компонентов, они называются *гибридными*.

Классификация КМ по материалу матрицы (материаловедческий принцип). Общее название КМ, как правило, происходит от материала матрицы, поэтому различают:

металлические композиционные материалы (МКМ) – КМ с металлической матрицей;

полимерные композиционные материалы (ПКМ) – КМ с полимерной матрицей;

неорганические композиционные материалы – КМ с неорганической матрицей.

На рис. 9.20 приведен один из наиболее простых вариантов разделения композитов по типу матричного материала.

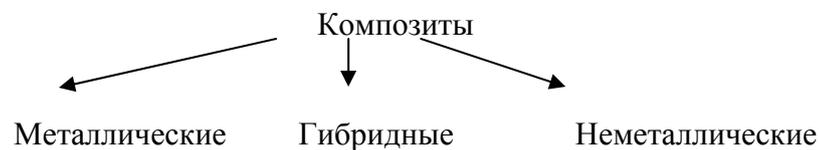


Рис. 9.20. Классификация КМ по материалу матрицы

Названия полимерных КМ обычно состоят из двух частей. В первой части называется материал волокна, во второй приводится слово «пластик» или «волокнит». Например, ПКМ, армированные стекловолокном, называют *стеклопластиками* или *стекловолокнитами*. Для характеристики металлических композиционных материалов чаще используют двойное обозначение: вначале пишут материал матрицы, затем материал волокна. Например, обозначению Cu–W соответствует композиционный материал, в котором матрицей является медь, а волокнами – вольфрам.

В некоторых случаях для обозначения КМ используют одно сложное слово, например бороалюминий или углеалюминий.

Классификация КМ по структуре и расположению компонентов (матриц и наполнителей):

с каркасной структурой. К ним относятся, например, псевдосплавы, полученные методом пропитки;

с матричной структурой. Такую структуру имеют дисперсно-упрочненные и армированные композиционные материалы;

со слоистой структурой. К материалам данной группы относятся композиции, полученные из набора чередующихся слоев фольги или листов материалов различной природы или состава;

с комбинированной структурой. К ним относятся материалы, имеющие комбинацию первых трех групп.

Кроме того, по ориентации и типу арматуры все КМ можно разделить на следующие группы:

изотропные – КМ, которые имеют одинаковые свойства во всех направлениях;

анизотропные – КМ, свойства которых зависят от направления армирующего компонента;

хаотично-армированные – КМ, которые содержат армирующие элементы в виде дисперсных включений, дискретных или непрерывных волокон;

упорядоченно-армированные:

однонаправленные (одноосно-армированные);

двухосно-армированные (с плоскостным расположением арматуры);

трехосно-армированные (с объемным расположением арматуры).

ГЛАВА 10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

10.1. Обработка заготовок на металлорежущих станках

Обработка металлов резанием – процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки с целью получения заданной геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхности детали. Для обработки детали режущий инструмент и заготовку необходимо установить и закрепить в рабочих органах станка и сообщить им относительные движения.

10.1.1. Основы теории резания

Движения, обеспечивающие срезание с заготовки поверхностного слоя металла или изменение состояния обработанной поверхности, называют *движениями резания*. К ним относят главное движение и движение подачи.

Главным движением называется движение, определяющее скорость деформирования и отделения стружки.

Движением подачи называется движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущей кромки инструмента в материал заготовки. Эти движения могут быть вращательными, поступательными, возвратно-поступательными, непрерывными или прерывистыми.

Для любого процесса резания можно составить схему обработки (рис. 10.1), на которой условно изображают обрабатываемую заготовку 2, ее базирование 8 и закрепление 7 в рабочем приспособлении станка 3, режущий инструмент 1 в положении, соответствующем концу обработки. Везде далее на схемах обработки движение резания плавно обозначается через его скорость V , движение подачи обозначается через скорость подачи S . Движение подачи может быть продольное $S_{\text{прод}}$, поперечное $S_{\text{поп}}$, вертикальное $S_{\text{в}}$, круговое $S_{\text{круг}}$ и др. В процессе резания на заготовке различают: обрабатываемую поверхность 4, с которой снимают стружку; поверхность резания 5, образуемую в результате воздействия главной режущей кромки инструмента, обработанную поверхность 6, полученную в процессе обработки.

10.1.2. Элементы процесса резания и геометрия срезаемого слоя

Элементами процесса резания являются скорости главного движения резания и подачи, а также глубина резания. Совокупность этих элементов называется *режимом резания*.

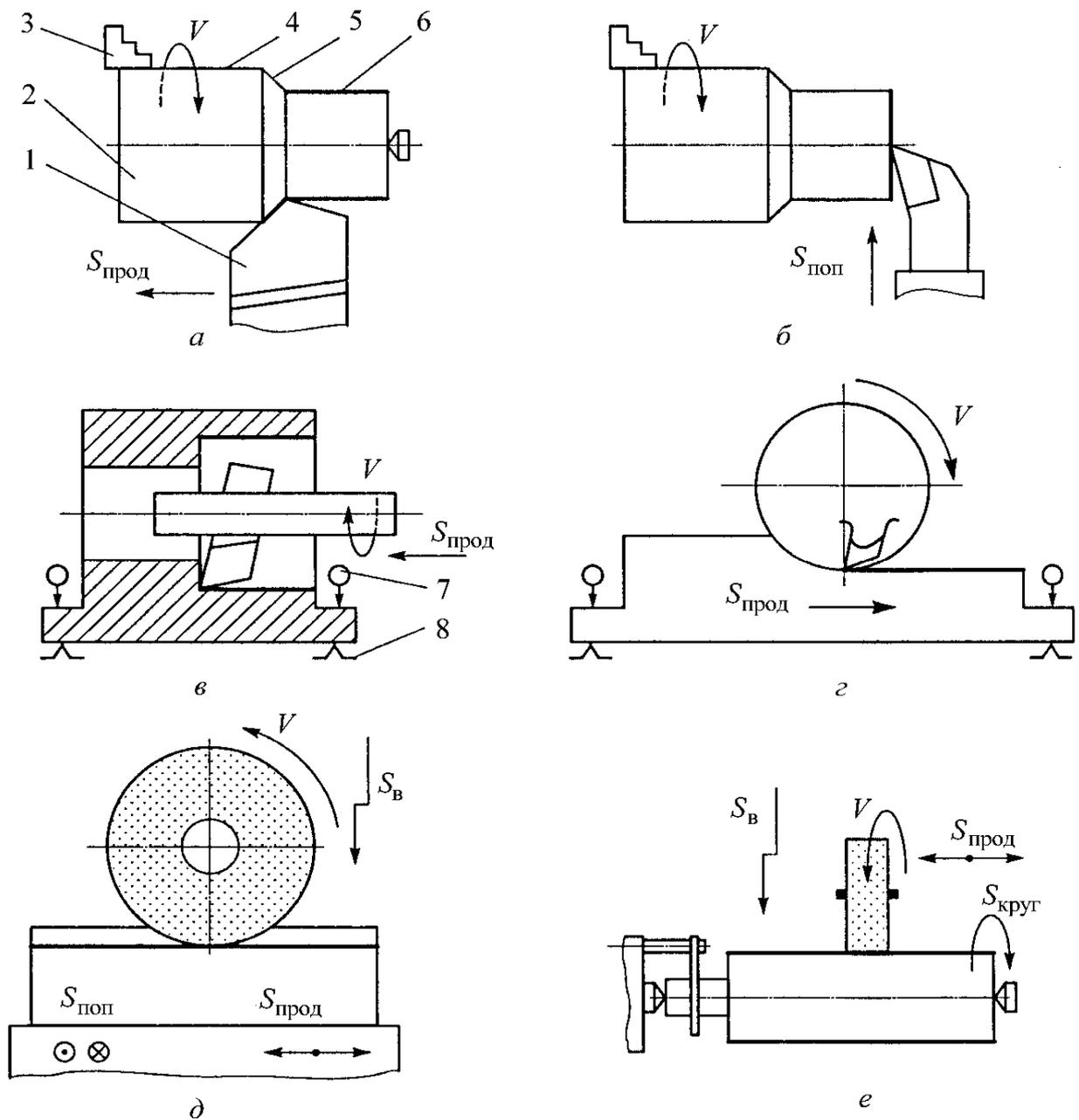


Рис. 10.1. Схемы обработки заготовок: *a* – продольным точением; *б* – поперечным точением; *в* – растачиванием; *г* – фрезерованием; *д* – плоским шлифованием; *е* – круглым шлифованием; 1 – режущий инструмент; 2 – заготовка; 3 – станочное (рабочее) приспособление; 4 – обрабатываемая поверхность; 5 – поверхность резания; 6 – обработанная поверхность; 7 – прижим; 8 – базирующий элемент; V – движение резания; $S_{\text{прод}}$, $S_{\text{поп}}$, $S_{\text{в}}$, $S_{\text{круг}}$ – соответственно продольное, поперечное, вертикальное и круговое движения подачи

Скорость резания V – путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в единицу времени в направлении главного движения. Размерность скорости резания: для лезвийной обработки – метр в минуту, для абразивной обработки – метр в секунду.

Если главное движение является вращательным, то:
для лезвийной обработки

$$V = \pi Dn / 1000,$$

для шлифования

$$V = \pi Dn / (1000 \cdot 60),$$

где D – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки или диаметр вращающегося инструмента, мм; n – частота вращения заготовки (инструмента), об/мин.

Если главное движение является возвратно-поступательным, а скорости рабочего и холостого ходов разные, средняя скорость, м/мин,

$$V = (K + 1)Lm / 1000,$$

где $K = V_{р.х} / V_{х.х}$ – коэффициент отношения скорости рабочего хода $V_{р.х}$ к скорости холостого хода $V_{х.х}$; L – расчетная длина хода резца, мм; m – число двойных ходов резца в минуту.

Скорость движения подачи (подача) S – путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в единицу времени в направлении движения подачи. Различают:

подачу в минуту (минутную) S_m – перемещение режущего инструмента в минуту, мм/мин;

подачу на оборот S_o – перемещение режущего инструмента за один оборот заготовки или инструмента, мм/об;

подачу на зуб S_z (для многозубых инструментов) – перемещение режущего инструмента за время поворота на угол, равный угловому шагу зубьев, мм/зуб;

подачу на двойной ход S_{2x} – перемещение режущего инструмента за один двойной ход, мм/2х.

$$S_m = S_o n = S_z n z = S_{2x}$$

где z – число зубьев инструмента.

Глубина резания t – кратчайшее расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями, мм. При точении ([рис. 10.2](#)) глубина резания

$$t = 0,5(D_3 - d),$$

где D_3 и d – соответственно диаметры заготовки и обработанной поверхности, мм.

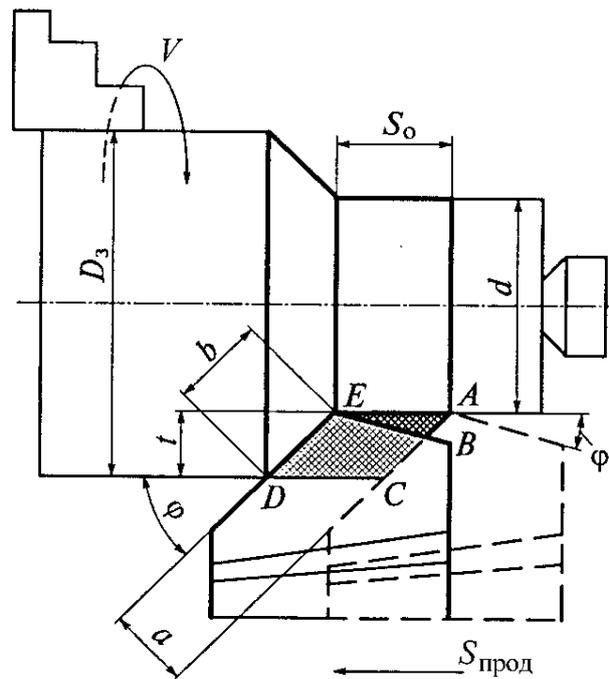


Рис. 10.2. Элементы процесса резания и геометрия срезаемого слоя: D_3 – диаметр заготовки; d – диаметр обработанной поверхности; V – движение резания; $S_{\text{прод}}$ – движение продольной подачи; S_0 – подача на оборот; t – глубина резания; a, b – толщина и ширина срезаемого слоя; φ, φ_1 – углы в плане; CDE – сечение срезаемого слоя; ABE – несрезанный гребешок

Форма и размеры срезаемого слоя (см. [рис. 10.2](#)) зависят от глубины резания, подачи на оборот, геометрии режущего инструмента (углов φ и φ_1) и формы режущей кромки инструмента. При перемещении инструмента вдоль оси заготовки его вершина описывает винтовую линию с шагом, равным S_0 . Следовательно, не вся площадь поперечного сечения материала $ACDE$ будет срезана с заготовки. Действительное сечение срезаемого слоя $BCDE = ACDE - ABE$. Остаточное сечение ABE в виде винтовой линии останется на заготовке. Однако фактическая шероховатость обработанной поверхности определяется не только остаточным сечением ABE , но и физико-механическими свойствами материала заготовки, вибрациями технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь».

10.1.3. Элементы и части токарного прямого проходного резца

Токарный прямой проходной резец ([рис. 10.3](#)) состоит из рабочей части (головки) 2 и тела (стержня) 3. Тело резца служит для его установки и закрепления в резцедержателе.

Рабочая часть резца образуется при его заточке и содержит следующие элементы: передняя поверхность 4 (поверхность, по которой сходит стружка); главная задняя поверхность 7 (она наиболее развита и направлена по движению подачи); вспомогательная задняя поверхность 1 (направлена против движения подачи). Пересечение передней и главной задней поверхностей

дает главную режущую кромку 6, пересечение передней и вспомогательной задней поверхностей дает вспомогательную режущую кромку 5. Режущие кромки пересекаются в вершине резца 8. Расположение поверхностей и кромок резца определяется его заточкой (геометрия инструмента).

Для определения углов, под которыми располагаются элементы инструмента, вводят координатные плоскости. Рассматривают три системы координат: инструментальную, статическую и динамическую. В инструментальной системе координат инструмент рассматривается как геометрическое тело. В статической системе координат скорость главного движения отлична от нуля, а скорость движения подачи равна нулю. В динамической системе координат скорости главного движения и движения подачи отличны от нуля.

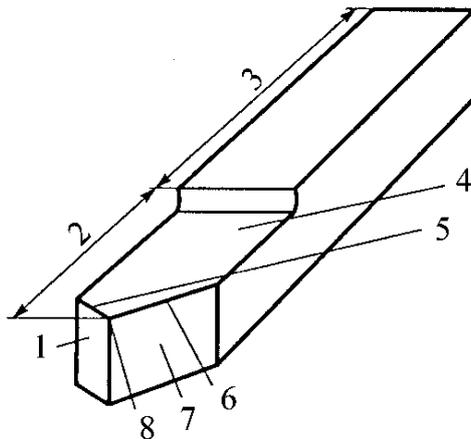


Рис. 10.3. Элементы токарного прямого проходного резца: 1 – вспомогательная задняя поверхность; 2 – головка резца; 3 – тело резца; 4 – передняя поверхность; 5, 6 – вспомогательная и главная режущие кромки соответственно; 7 – главная задняя поверхность; 8 – вершина резца

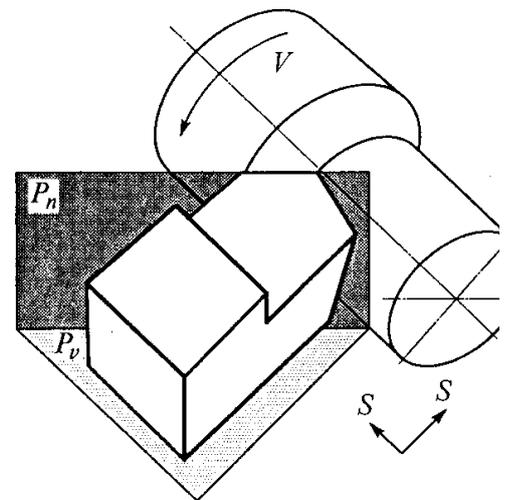


Рис. 10.4. Координатные плоскости токарного проходного резца: V – движение резания; S – движения подачи; P_v – основная плоскость; P_n – плоскость резания

На [рис. 10.4](#) показаны координатные плоскости токарного проходного резца в статической системе координат. Основная плоскость P_v параллельна всем возможным направлениям движения подачи для данного способа обработки. Плоскость резания P_n проходит через главную режущую кромку касательно поверхности резания. Главная секущая плоскость P_τ проходит через главную режущую кромку перпендикулярно поверхности резания (на [рис. 10.4](#) не показана).

10.1.4. Геометрия инструмента и ее влияние на процесс резания и качество обработки

Рассмотрим геометрию режущей части инструмента в статической системе координат на примере токарного проходного резца ([рис. 10.5](#)).

Главные углы рассматриваются в главной секущей плоскости P_τ . Глав-

ный задний угол α – угол между касательной к главной задней поверхности в рассматриваемой точке главной режущей кромки и плоскостью резания. Наличие угла уменьшает трение между обработанной и главной задней поверхностями, что увеличивает стойкость инструмента. Однако чрезмерное увеличение угла приводит к уменьшению прочности режущего лезвия. Величина угла – $5\text{--}10^\circ$ и выбирается в зависимости от упругих свойств обрабатываемого материала. Для тех видов обработки, при которых скорость подачи соизмерима со скоростью главного движения (нарезание резьбы), угол выбирается в пределах $8\text{--}14^\circ$. Главный передний угол γ – угол между основной плоскостью и передней поверхностью. Он может быть положительным (если передняя поверхность расположена ниже основной плоскости), равным нулю (передняя поверхность совпадает с основной плоскостью) и отрицательным (если передняя поверхность расположена выше основной плоскости).

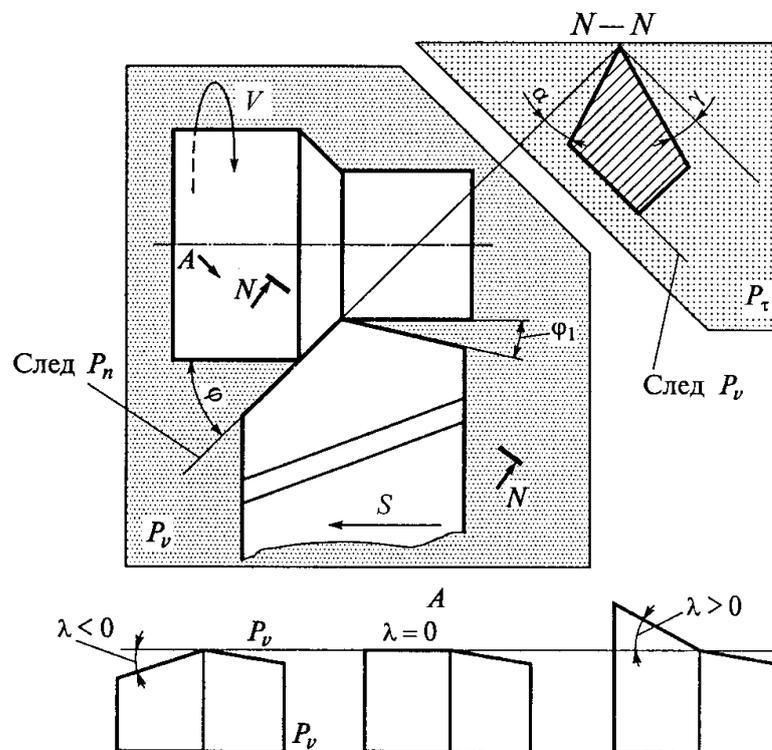


Рис. 10.5. Углы реза в статической системе координат: V – движение резания; S – движение подачи; P_v – основная плоскость; P_n – плоскость резания; P_t – главная секущая плоскость; α , γ – главные задний и передний углы; ϕ , ϕ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; λ – угол наклона главной режущей кромки

Величина угла оказывает большое влияние на процесс резания. С увеличением угла уменьшаются деформации срезаемого слоя (режущему клину легче врезаться в металл), улучшаются условия схода стружки, уменьшаются силы резания, повышается качество обработки. Однако чрезмерное увеличение угла приводит к уменьшению прочности режущего лезвия, увеличению износа режущего лезвия вследствие выкрашивания, к ухудшению теплоотвода от инструмента. При обработке низкоуглеродистых и низколегирован-

ных сталей быстрорежущим инструментом угол γ выбирают в пределах 12–18°. При обработке вязких материалов угол увеличивают, а при обработке хрупких и твердых материалов – уменьшают вплоть до отрицательных значений.

Углы в плане рассматриваются между направлением движения подачи и проекцией соответствующей режущей кромки на основную плоскость. Главный угол в плане φ – угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением движения подачи. Угол определяет параметры переходного конуса между обрабатываемыми цилиндрами и угол фасок, т. е. выбирается конструктором. В основном угол влияет на шероховатость обработанной поверхности. С уменьшением угла шероховатость понижается, одновременно уменьшается толщина и увеличивается ширина срезаемого слоя, следовательно, уменьшаются сила и температура резания, приходящиеся на единицу длины режущей кромки, но резко увеличивается сила резания в направлении, перпендикулярном оси заготовки. Вспомогательный угол в плане φ_1 – угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением движения подачи. С уменьшением угла понижается шероховатость обработанной поверхности, одновременно увеличиваются прочность режущего лезвия и его стойкость.

Угол наклона главной режущей кромки λ – это угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью, проведенной через вершину резца. Если вершина резца является высшей частью главной режущей кромки, $\lambda > 0$; если совпадает с основной плоскостью, $\lambda = 0$; если вершина является низшей частью главной режущей кромки, $\lambda < 0$. С увеличением угла ухудшается качество обработанной поверхности. Но чаще всего выбор величины и знака угла определяется направлением схода стружки. При отрицательных значениях угла λ стружка сходит по направлению движения подачи, что безопасно при работе на универсальных станках; при положительных – стружка сходит по направлению против движения подачи, что безопасно при работе на станках с автоматическим и полуавтоматическим циклом. Положительные углы применяются при обработке отверстий для того, чтобы стружка выходила из отверстия.

Материалы, применяемые для различного режущего инструмента рассмотрены в [главе 2](#).

10.1.5. Физические основы процесса резания металлов

Резание металлов – это сложный процесс физико-химического взаимодействия режущего инструмента, заготовки и окружающей среды. Упрощенно процесс резания можно представить в виде схемы, показанной на [рис. 10.6](#). На режущем лезвии реального резца можно различить округление лезвия BC и площадку износа AB , поэтому реальной передней поверхностью будет поверхность BCF , а реальной задней поверхностью – GAB . В начальный момент режущее лезвие инструмента вдавливается в металл, в срезае-

мом слое возникают упругие деформации, которые затем переходят в пластические. В плоскости, перпендикулярной траектории перемещения резца, возникают нормальные напряжения σ , а в плоскости, совпадающей с траекторией перемещения резца, – касательные напряжения τ . В оконечности передней поверхности (точка B) касательные напряжения τ наибольшие и уменьшаются по мере удаления от точки B . Нормальные напряжения σ вначале действуют как растягивающие ($+\sigma$), а затем быстро уменьшаются до нуля и переходят в напряжения сжатия ($-\sigma$). Срезаемый слой металла пластически деформируется. Рост пластических деформаций приводит к деформации сдвига, т. е. смещению частей кристалла относительно друг друга. Деформации происходят в зоне $BDEC$, называемой *зоной стружкообразования*.

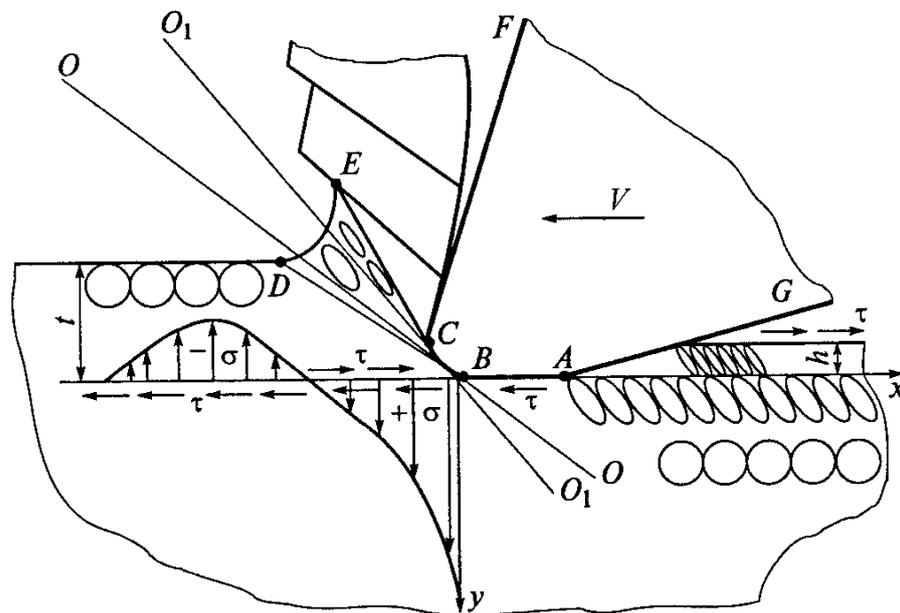


Рис. 10.6. Схема процесса резания: V – движение резания; BCF – передняя поверхность; GAB – задняя поверхность; BD – плоскость скалывания; $BDEC$ – зона стружкообразования; OO – плоскость сдвига; O_1O_1 – направление осей деформированных кристаллов; h – упругое восстановление обработанной поверхности; t – глубина резания; σ , τ – нормальные и касательные напряжения соответственно

В плоскости CE происходит разрушение кристаллов (скалывание отдельных элементарных объемов металла) и образуется сегмент стружки. Далее процесс повторяется. Условно считают, что деформации сдвига происходят в плоскости OO , называемой *плоскостью сдвига*. Она располагается под углом 30° к направлению движения резца. Срезанный сегмент стружки претерпевает дополнительную деформацию вследствие трения о переднюю поверхность и завивается в спираль. Структура металла в зоне $BDEC$ отличается от структуры нижележащих слоев основного металла. (На [рис. 10.6](#) недеформированные слои условно показаны в виде окружностей, по мере деформации окружности сплющиваются и большая ось получившихся овалов

располагается под углом к линии OO). Характер деформаций срезаемого слоя зависит от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента, условий обработки, режимов резания и т. д.

При резании с малыми скоростями и большими величинами подачи и глубины резания стружка имеет ярко выраженные плоскости сдвига и сегменты (стружка скалывания). При резании с большими скоростями и малыми величинами подачи и глубины резания стружка имеет вид сплошной ленты: прирезцовая сторона гладкая, на внешней стороне видны небольшие пилообразные зазубрины (сливная стружка). Такая стружка может травмировать оператора (токаря), ее сложно убирать со станка, сложно транспортировать в отделение переработки стружки, поэтому необходимо применять специальные устройства для ее дробления (например, стружколомные канавки на передней поверхности резца). При обработке хрупких материалов пластическая деформация практически отсутствует; стружка имеет вид отдельных, не связанных друг с другом сегментов (стружка надлома).

По мере прохождения режущего инструмента обработанная поверхность, вследствие воздействий упругих и пластических деформаций, упруго восстанавливается на величину h и структура поверхностных слоев отличается от структуры сердцевины. Твердость поверхностного слоя будет выше твердости сердцевины, образуется так называемый *наклепанный слой*, наклеп. Величины упругого восстановления обработанной поверхности, твердости поверхностного слоя, глубины расположения наклепанного слоя и эпюры напряжений зависят от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента, условий обработки, режимов резания. Чем больше упругопластические свойства обрабатываемого материала, чем больше применяемые глубина резания и подача и чем меньше скорость резания, тем больше величина упругого восстановления обработанной поверхности, твердость поверхностного слоя и тем глубже распространен наклеп.

10.1.6. Силы резания

Под силой резания понимают силу сопротивления перемещению режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки. Работа силы резания затрачивается на упругое и пластическое деформирование металла, на его разрушение, на трение задней поверхности об обработанную поверхность и стружки о переднюю поверхность режущего инструмента. Результатом сопротивления металла заготовке процессу резания является возникновение реактивных сил, воздействующих на режущий инструмент ([рис. 10.7, а](#)).

Реактивные силы – это силы упругого (P_{y1} и P_{y2}) и пластического ($P_{п1}$ и $P_{п2}$) деформирования, направленные перпендикулярно соответственно задней и передней поверхностям инструмента, и силы трения (T_1 и T_2) по задней и передней поверхностям. Векторная сумма всех этих сил даст единичную силу резания по сечению резца. Просуммировав единичные силы, получим

равнодействующую силу резания $P = P_{п1} + P_{п2} + P_{y1} + P_{y2} + T_1 + T_2$.

Однако вследствие переменности условий резания (неоднородность структуры металла заготовки, допуски на размеры обрабатываемой поверхности и т. д.) равнодействующая сила резания P переменна по величине и направлению, поэтому для расчетов используют не силу P , а ее проекции на заданные координатные оси (рис. 10.7, б):

$$P = P_x + P_y + P_z.$$

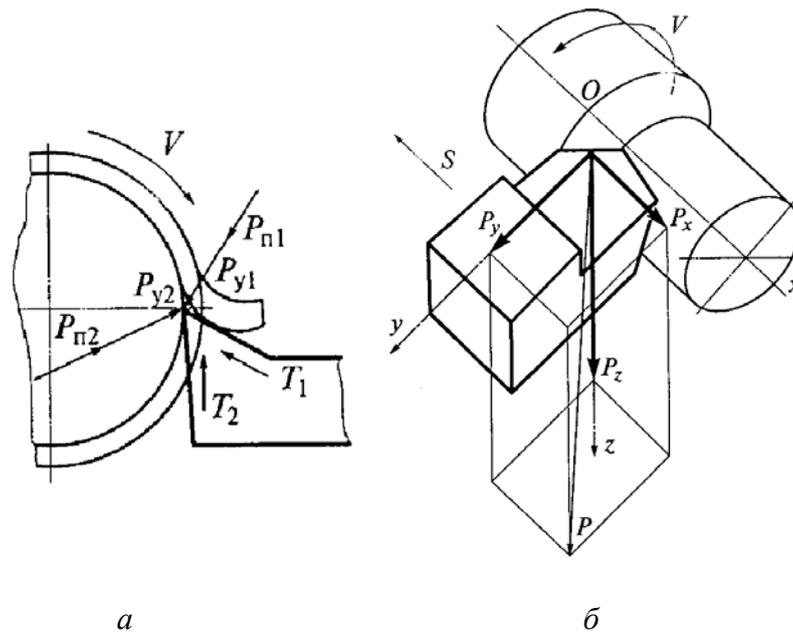


Рис. 10.7. Сила резания: а – плоская система сил; б – разложение силы резания на составляющие; P_{y1} , $P_{п1}$ – реактивные силы упругой и пластической деформации по передней поверхности; P_{y2} , $P_{п2}$ – реактивные силы упругой и пластической деформации по задней поверхности; T_1 , T_2 – силы трения; P – сила резания; P_z , P_x , P_y – соответственно главная, осевая и нормальная составляющие силы резания

Ось O_x проводят в направлении, противоположном направлению движения подачи, ось O_z – в направлении главного движения, ось O_y – в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности. Полученные проекции: P_z – главная составляющая силы резания; P_x – тангенциальная (осевая) составляющая силы резания; P_y – нормальная (радиальная) составляющая силы резания. Причем использование составляющих силы резания оказалось очень удобно. Во-первых, по силе P_z определяют параметры механизма главного движения станка, по силе P_x – параметры механизма подачи станка, сила P_y является одним из главных элементов расчета точности обработки. Во-вторых, соотношение составляющих силы резания для различных схем обработки и различных пар «материал заготовки – материал режущей части инструмента» достаточно стабильно. Например, для наружного точения низколегированных сталей быстрорежущим инструментом соотношение $P_z : P_y : P_x$ находится в пределах $1 : (0,4-0,6) : (0,2-0,4)$.

Главную составляющую силы резания P_z определяют по эмпирической формуле

$$P_z = C_p t^{XP} S^{YP} V^{ZP} K_1 K_2 \dots K_i,$$

где C_p – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/мин; V – скорость резания, м/мин; показатели степени XP , YP , ZP и коэффициенты $K_1 K_2 \dots K_i$ учитывают факторы, не вошедшие в формулу.

Аналогичные формулы существуют и для расчета других составляющих силы резания.

10.1.7. Износ и стойкость режущего инструмента

Все физико-химические процессы, возникающие при резании металлов (трение стружки о переднюю поверхность резца, трение обработанной поверхности о заднюю поверхность резца, высокая температура и высокое давление в зоне резания, окисление материала передней поверхности и т. д.), приводят к изнашиванию режущего инструмента.

Различают износ ([рис. 10.8](#)) по передней поверхности (вытирание лунки шириной b) и износ по задней поверхности (ленточка шириной h_3). Для различных инструментальных материалов и разных условий резания изнашивание инструмента происходит с различной интенсивностью, и одни виды износа могут превалировать над другими. Например, при точении быстрорежущими сталями при срезании тонких стружек (толщиной менее 0,15 мм) преобладает износ по главной задней поверхности; при обработке на больших скоростях и при срезании толстых стружек (толщиной более 0,5 мм) преобладает износ по передней поверхности; при срезании стружек толщиной от 0,15 до 0,5 мм происходит одновременное изнашивание по передней и задней поверхностям.

Для определения оптимального времени работы инструмента исследуют зависимость износа инструмента от времени его работы. Время работы инструмента от переточки до переточки называется *стойкостью*. *Физическая стойкость* T_{ϕ} – время работы инструмента до аварийного изнашивания.

При чистовой обработке детали износ режущего инструмента может существенно влиять на точность обработки вследствие уменьшения его фактического вылета. Поэтому для чистовой обработки назначают размерную стойкость T_p (инструмент изнашивается до величины, при которой происходит существенное влияние износа на точность обработки детали).

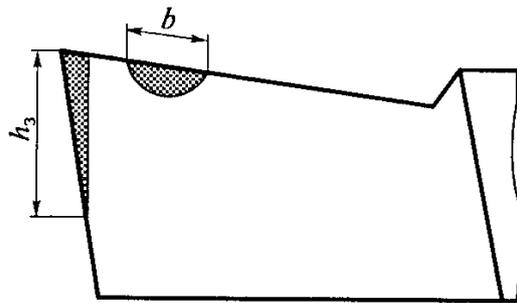


Рис. 10.8. Износ режущего инструмента по задней (h_3) и передней (b) поверхностям

Таблица 10.1

Нормативные значения показателя m для различных условий обработки

Режущий инструмент	Материал режущей части	Обрабатываемый материал		
		Сталь конструкционная	Сталь нержавеющая	Чугун
Токарные резцы	Быстрорежущая сталь	0,125–0,3	0,15	0,15
	Твердый сплав	0,18–0,27	0,15	0,2–0,28
Фрезы	Быстрорежущая сталь	0,2–0,33	0,14–0,27	0,15–0,25
	Твердый сплав	0,2–0,33	0,32	0,32–0,42
Сверла	Быстрорежущая сталь	0,2	0,12	0,125
	Твердый сплав	–	–	0,4
Зенкеры	Быстрорежущая сталь	0,3	0,12	0,125
Развертки Метчики Плашки	Быстрорежущая сталь	0,4	0,12	0,3
		0,9	–	0,6
		0,5	–	–

Кроме физической и размерной стойкости различают *минутную стойкость* T_m – период работы в минутах, *штучную стойкость* $T_{шт}$ – количество обработанных деталей до переточки инструмента.

Наибольшее влияние на стойкость инструмента оказывает скорость резания, поэтому в расчетах стойкости чаще всего используется зависимость

$$T = C / V^m,$$

где C – постоянная величина; V – скорость резания; m – показатель относительной стойкости (табл. 10.1).

10.1.8. Смазывающе-охлаждающие технологические среды

Современные *смазывающе-охлаждающие технологические среды* (СОТС) – это сложные многокомпонентные соединения продуктов нефтяного и химического производства. Цель использования СОТС – повышение стойкости инструмента, уменьшение силы резания, улучшение качества обработанной поверхности, удаление стружки из зоны резания. В основе действия СОТС лежат следующие эффекты: смазочный, охлаждающий и моющий.

Смазочный эффект – уменьшение сил адгезии и трения на поверхностях инструмента. Необходимым условием проявления этого эффекта является способность СОТС проникать между контактирующими поверхностями по капиллярам и образовывать там пленки, уменьшающие коэффициент трения.

Охлаждающий эффект – снижение температуры в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом за счет уменьшения тепловыделения и увеличения теплоотвода. Уменьшение тепловыделения происходит благодаря влиянию СОТС на прочность отделяемого слоя материала, повышение его хрупкости, уменьшение работы, затрачиваемой на стружкообразование.

Интенсивность теплоотвода в основном зависит от вязкости, теплопроводности и скорости движения СОТС, разности температур охлаждаемой поверхности и СОТС. При непрерывных процессах резания СОТС практически не достигает контактных поверхностей в зоне резания, поэтому снижение температуры происходит только в результате охлаждения режущего инструмента и обрабатываемой детали. Следовательно, интенсивность охлаждения можно повысить за счет высоконапорной подачи СОТС, подачи СОТС со стороны задней поверхности или по специальным каналам, изготовленным в теле инструмента, подачи СОТС в виде тумана. При этом СОТС в виде эмульсии или в виде водных растворов имеют лучшие охлаждающие свойства по сравнению с масляными СОТС.

Моющий эффект – это обеспечение выноса из зоны резания стружки, продуктов изнашивания режущего инструмента и продуктов распада СОТС. Особенно важен этот эффект при выполнении финишных операций.

Неправильное применение СОТС может привести к негативным последствиям (особенно при низких скоростях резания) из-за химического и электрохимического взаимодействия СОТС с поверхностями инструмента, уменьшения защитного действия нароста при черновых операциях. Сопоставление стойкости инструментов с охлаждением и без такового показывает, что существует пороговая скорость, ниже которой применение СОТС нежелательно. Так, для быстрорежущих инструментов пороговой скоростью является скорость резания 10 м/мин, причем чем больше сечение резца, тем ниже значение пороговой скорости. При применении твердосплавных инструментов пороговой скоростью резания является скорость 80 м/мин при использовании распыленной СОТС и 100 м/мин при использовании охлаждения поливом.

В отечественной промышленности используются масляные и водорастворимые СОТС. Масляные СОТС состоят из минерального масла (60–95 %) и присадок (антифрикционных, антизадирных, антитуманных, ингибиторов коррозии и т. д.). К основным маркам масляных СОТС относятся:

сульфофрезолы – осерненное минеральное масло средней вязкости. Недостатком сульфофрезолов является то, что они вызывают коррозию цветных сплавов и отрицательно воздействуют на человека. Достоинством является только их дешевизна;

МР-1 – средневязкое минеральное масло с антизадирными и антиизносными присадками, содержащими серу, фосфор и хлор; эффективно при обработке углеродистых и легированных сталей со скоростями резания более 40 м/мин;

ОСМ-3 – маловязкое минеральное масло с антизадирными и антиизносными присадками, содержащими фосфор и хлор; эффективно при чистовой обработке углеродистых и легированных сталей.

Водорастворимые СОТС (эмульсолы) содержат 70–85 % минерального масла, эмульгаторы (вещества, облегчающие получение эмульсии) и присадки. Для уменьшения расходов на транспортировку и хранение эти СОТС выпускаются в виде концентрата, который по мере необходимости потребитель разбавляет водой до необходимой концентрации. К основным маркам водорастворимых СОТС относятся:

Э-1, Э-2, Э-3 – эмульсолы с низкими технологическими свойствами;

ЭТ-2 имеет лучшие технологические свойства и большую стабильность состава;

«Укринол-1» имеет в составе ингибиторы коррозии, обладает высокими технологическими свойствами, повышает стойкость твердосплавного инструмента (по сравнению с ЭТ-2) в 1,5–2 раза;

РЗ-СОЖ8 – эмульсол на базе ЭТ-2, активированного кристаллическим йодом; эффективен при обработке титановых сплавов.

10.1.9. Точность обработки и качество обработанной поверхности

Под точностью обработки понимается соответствие изготовленного изделия или партии изделий (детали, узла, машины) эталону, т. е. его (ее) чертежу. Применительно к обрабатываемым деталям различают размерную точность (соответствие размеров изделия чертежу), геометрическую точность (соответствие формы, волнистости и шероховатости поверхности требованиям чертежа), соответствие физико-химических свойств, структурного состояния поверхностных слоев (микротрещины, надрывы, измельченная структура), соответствие остаточных напряжений в поверхностных и глубинных слоях детали (глубина их проникновения, величина, знак) требованиям чертежа и т. д.

Размерная точность. В соответствии с требованиями Международной организации по стандартизации (ISO) в России весь диапазон размеров и допусков разбит на 19 квалитетов (01–17). Точные квалитеты (01–1) назначаются весьма редко, главным образом при изготовлении плоско-параллельных концевых мер длины. Квалитеты 1–4 применяются для изготовления рабочих и контрольных калибров. Обычные детали машин изготавливают по 4–12-му квалитетам. По грубым квалитетам (13–17) задаются допуски на свободные (неответственные или несопрягаемые) поверхности.

Геометрическая точность поверхности. Поверхность, отделяющая деталь от окружающей среды, называется *реальной поверхностью*. Эта поверхность образуется при обработке и в отличие от номинальной поверхности (поверхности, указанной на чертеже) имеет неровности различной формы и высоты.

Различают следующие погрешности геометрической точности: макрогеометрия (погрешности формы), волнистость и микрогеометрия (шероховатость).

Погрешности формы рассматривают на больших участках реальной поверхности (отношение шага неровностей к их высоте – более 1000). Под этим показателем понимается конусообразность, овальность, неплоскостность обработанной поверхности. Эти параметры должны укладываться в требования соответствующих стандартов России или в требования чертежа.

Шероховатость поверхности – совокупность неровностей, образующих рельеф поверхности (отношение шага неровностей к их высоте – менее 50) и рассматриваемых в пределах определенного ее участка (базовой длины).

Волнистость занимает промежуточное положение между погрешностью формы и шероховатостью.

Физико-механическое состояние обработанной поверхности. Поверхностные слои детали после механической обработки пластически деформированы, поэтому физическое состояние этих слоев в основном характеризуется деформационными изменениями в них. Следствием этих изменений является деформационное упрочнение (наклеп) поверхности и степень деформации отдельных зерен.

10.1.10. Производительность обработки

Количество деталей, выпускаемых в единицу времени, называется *производительностью обработки* и рассчитывается по формуле

$$Q = 1 / T_{шт.}$$

Штучное время $T_{шт}$ складывается из основного технологического T_0 , подготовительно-заключительного $T_{п-з}$ времени и времени на организацион-

ное и техническое обслуживание рабочего места $T_{\text{орг.тех}}$.

Основное технологическое время, т. е. время, затрачиваемое непосредственно на обработку поверхности (детали)

$$T_o = T_m + T_b + T_{x.x}.$$

Машинное время T_m , – это время, затрачиваемое на снятие стружки; рассчитывается по формуле

$$T_m = L / (nS_o t),$$

где L – длина обработки, мм; n – частота вращения, об/мин; S_o – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм.

Вспомогательное время T_b затрачивается на перемещение режущего инструмента с рабочей подачей: подвод, врезание, прохождение участков, не требующих снятия стружки, перебег (гарантированный отвод инструмента).

Время холостых ходов $T_{x.x}$ затрачивается на быстрый подвод-отвод режущего инструмента в зону обработки.

10.2. Общие сведения о металлорежущих станках

10.2.1. Классификация металлорежущих станков

Металлорежущие станки можно классифицировать по отдельным признакам или по комплексу признаков.

По технологическому назначению различают станки токарной, фрезерной, сверлильной и других групп.

По степени универсальности различают станки универсальные, широкого назначения, специализированные и специальные. Универсальные станки предназначены для выполнения разнообразных работ по обработке различных заготовок, станки широкого назначения – для выполнения определенного перечня, специализированные станки – для обработки заготовок одного наименования, но разных размеров (например, обработка зубчатого венца на зубофрезерном станке). На специальных станках выполняют один вид работ на конкретной заготовке. Изменение любого размера заготовки требует модернизации станка.

По степени автоматизации различают станки с ручным управлением, полуавтоматы, автоматы, станки с программным управлением. *Автомат* – станок, для возобновления цикла обработки которого не требуется непосредственное участие человека. Если для возобновления цикла обработки нужно только нажать кнопку «Пуск», то формально это станок-полуавтомат.

По числу главных рабочих органов различают одно- и многошпиндельные станки, одно- и многопозиционные станки и т. д.

По точности различают пять классов точности станков: Н – нормальный, П – повышенный, В – высокий, А – особо высокой точности, С – особо точные станки.

В российском машиностроении принята Единая система условных обозначений станков, в соответствии с которой каждому станку присваивается определенный шифр. Первые две цифры шифра указывают группу и тип станка. Буква на втором или третьем месте позволяет различить станки одного типоразмера, но с разными техническими характеристиками. Третья или четвертая цифры показывают условный типоразмер станка. Последняя буква обозначает различные модификации станков одной базовой модели.

Все металлорежущие станки разбиты на 10 групп, а каждая группа, как правило, – на 10 типов. В представленной ниже классификации номер и название группы указаны курсивом, номер (от 0 до 9) и название типа указаны в скобках.

Группа 0 – резервная.

Группа 1 – токарные станки (0 – специализированные автоматы и полуавтоматы; 1 – одношпиндельные автоматы и полуавтоматы; 2 – многошпиндельные автоматы и полуавтоматы; 3 – револьверные; 4 – сверлильно-отрезные; 5 – карусельные; 6 – токарные и лобовые; 7 – многорезцовые; 8 – специализированные; 9 – разные токарные).

Группа 2 – сверлильные и расточные станки (0 – резервный; 1 – вертикально-сверлильные; 2 – одношпиндельные полуавтоматы; 3 – многошпиндельные полуавтоматы; 4 – координатно-расточные; 5 – радиально-сверлильные; 6 – горизонтально-расточные; 7 – алмазно-расточные; 8 – горизонтально-сверлильные; 9 – разные сверлильные).

Группа 3 – шлифовальные и доводочные станки (0 – резервный; 1 – круглошлифовальные; 2 – внутришлифовальные; 3 – обдирочные шлифовальные; 4 – специализированные шлифовальные; 5 – резервный; 6 – заточные; 7 – плоскошлифовальные; 8 – притирочные и полировочные; 9 – разные, работающие абразивом).

Группа 4 – комбинированные станки.

Группа 5 – зубо- и резьбообрабатывающие станки (0 – резбонарезные; 1 – зубострогальные для цилиндрических колес; 2 – зуборезные для конических колес; 3 – зубофрезерные; 4 – для нарезания червячных пар; 5 – для обработки торцов зубьев; 6 – резьбофрезерные; 7 – зубоотделочные и поверочные; 8 – зубо- и резьбошлифовальные; 9 – разные зубо- и резьбообрабатывающие станки).

Группа 6 – фрезерные станки (0 – резервный; 1 – вертикальные консольные; 2 – непрерывного действия; 3 – резервный; 4 – копировальные и гравировальные; 5 – вертикальные бесконсольные; 6 – продольные; 7 – кон-

сольные широкоуниверсальные; 8 – горизонтальные консольные; 9 – разные фрезерные).

Группа 7 – строгальные, долбежные, протяжные (0 – резервный; 1 – продольно-строгальные одностоечные; 2 – продольно-строгальные двухстоечные; 3 – поперечно-строгальные; 4 – долбежные; 5 – протяжные горизонтальные; 6 – резервный; 7 – протяжные вертикальные; 8 – резервный; 9 – разные строгальные).

Группа 8 – разрезные станки (0 – резервный; 1 – разрезные, работающие резцом; 2 – разрезные, работающие абразивным кругом; 3 – разрезные, работающие гладким диском; 4 – правильно-отрезные; 5 – пилы ленточные; 6 – пилы дисковые; 7 – пилы ножовочные).

Группа 9 – разные станки (1 – опиловочные; 2 – пилонасекательные; 3 – правильно- и бесцентрово-обдирочные; 4 – балансировочные; 5 – для испытания сверл и шлифовальных кругов; 6 – делительные машины).

Условный типоразмер станка обычно показывает наибольший размер обрабатываемой заготовки. Например, универсальный токарно-винторезный станок модели 16К20: высота центров, т. е. расстояние от оси вращения заготовки до направляющих, – 200 мм; вертикально-сверлильный станок модели 2Н135: наибольший диаметр сверления – 35 мм.

10.2.2. Кинематика станков

Привод металлорежущего станка – это совокупность механизмов, обеспечивающих заданные законы движения исполнительных органов станка. Различают механические, электрические, гидравлические и пневматические механизмы привода. Элементами механического привода станков являются валы, оси, зубчатые колеса, шкивы, муфты и т. д. На кинематических схемах все они имеют определенное условное обозначение ([табл. 10.2](#)).

По назначению механизмы привода делятся на двигатели и механизмы для передачи преобразования, реверсирования и регулирования скорости движения.

Таблица 10.2

Условные обозначения основных элементов кинематических схем станков

Наименование	Обозначение
Вал, ось, стержень	
Конец шпинделя для центровых работ	
Передача «винт – гайка»	
Подшипник: без уточнения типа радиальный качения радиальный скольжения	
Соединение двух валов: жесткое телескопическое эластичное	
Патрон: трехкулачковый четырёх- или шестикулачковый	
Муфта: кулачковая односторонняя фрикционная односторонняя фрикционная электромагнитная	
Соединение детали с валом:	
неподвижное свободное для вращения с помощью вытяжной шпонки подвижное вдоль оси	

Передающие механизмы (передачи) передают движение от одного элемента к другому. Различают ременные, цепные, зубчатые и червячные передачи.

Ременная передача состоит из ведущего вала (с шкивом диаметром d_1), ведомого вала (с шкивом диаметром d_2) и ремня (плоского или клинового). Ее передаточное отношение

$$i = (n_2 / n_1) \eta_p = (d_2 / d_1) \eta_p,$$

где n_2 , n_1 – частота вращения ведущего и ведомого валов соответственно; η_p – коэффициент проскальзывания ремня относительно поверхности шкивов, $\eta_p = 0,9-0,96$.

Цепная передача состоит из ведущего вала с звездочкой z_1 , ведомого вала с звездочкой z_2 и цепи. Ее передаточное отношение

$$i = n_2 / n_1 = z_1 / z_2.$$

Зубчатые передачи, цилиндрическая и коническая, состоят из ведущего вала с шестерней z_1 , ведомого вала с шестерней z_2 . Ее передаточное отношение

$$i = n_2 / n_1 = z_1 / z_2.$$

Червячная передача состоит из ведущего вала с червяком, имеющим K заходов, и ведомого вала с червячным колесом, имеющим z зубьев. Ее передаточное отношение

$$i = n_2 / n_1 = K / z.$$

Механизмы для преобразования движения. Для преобразования вращательного движения в поступательное в основном применяют реечную и винтовую передачи.

Реечная передача состоит из зубчатого колеса, имеющего z зубьев, и зубчатой рейки. Если модуль реечного зацепления m , то за один оборот колеса рейка переместится на величину $S = \pi m z$.

Винтовая передача состоит из вращающегося ходового винта, имеющего шаг t , и ходовой гайки. За один оборот ходового винта, имеющего k заходов, гайка переместится в осевом направлении на величину $S = tk$.

Механизмы для регулирования скорости движения. Ступенчатое изменение скорости производится за счет применения двух-, трех- и четырех-скоростных асинхронных электродвигателей или за счет применения набора зубчатых колес (редукторов).

Движение ведущего вала редуктора, вращающегося с постоянной частотой n_1 , передается на ведомый вал через две пары зубчатых колес (z_1 / z_4)

и (z_2 / z_3) . Дистанционное включение нужной пары производится фрикционными электромагнитными муфтами. Следовательно,

$$n_2 = n_1(z_4 / z_1) \text{ или } n_2 = n_1(z_3 / z_2).$$

К редукторам с механическим переключением передач относится редуктор с использованием блока шестерен. Блок прямозубых зубчатых колес (z_1, z_2, z_3) перемещается по шпонке или шлицам ведущего вала. На ведомом валу закреплены колеса z_4, z_5, z_6 . В зависимости от положения блока прямозубых зубчатых колес частота вращения ведомого вала

$$n_2 = n_1(z_6 / z_1) = n_1(z_5 / z_2) = n_1(z_4 / z_3).$$

Бесступенчатое изменение скорости возможно за счет применения вариаторов, в которых шкивы закреплены соответственно на ведомом и ведущем валах. Ролики закреплены на общей оси. При повороте оси роликов на угол $\pm\varphi$ обеспечивается плавное изменение частоты вращения ведомого вала.

Реверсивные механизмы. Изменение направления вращения всего привода возможно за счет переключения фаз асинхронного электродвигателя, изменения полярности подключения электродвигателя постоянного тока или применения зубчатых механизмов. В механизме с цилиндрическими зубчатыми колесами реверсирование движения осуществляется перемещением по шлицам ведомого вала кулачковой муфты. Для передачи движения с ведущего вала на ведомый вал применяется паразитное зубчатое колесо.

Делительные механизмы. Для поворота на заданный угол заготовки или элемента станка (деления), применяются шаговые электродвигатели, оптические или механические делительные головки. Достаточно часто применяется так называемый мальтийский крест, в котором непрерывное вращательное движение водила, закрепленного на ведущем валу, преобразуется (через специальный палец – цевку) в прерывистое вращательное движение одного направления (мальтийского креста). При равномерном мальтийском кресте угол его поворота за один оборот водила равен $360^\circ/z$, где z – число пазов на мальтийском кресте.

10.2.3. Кинематические схемы металлорежущих станков

Под кинематической схемой металлорежущего станка понимают условное изображение всех механизмов и передач, которые передают движение от привода к исполнительным органам станка.

Кинематическая цепь главного движения. Привод главного движения станка модели 1А616 (рис. 10.9) состоит из коробки скоростей, смонти-

рованной в передней тумбе, и механизма перебора, смонтированного вместе со шпинделем в передней бабке.

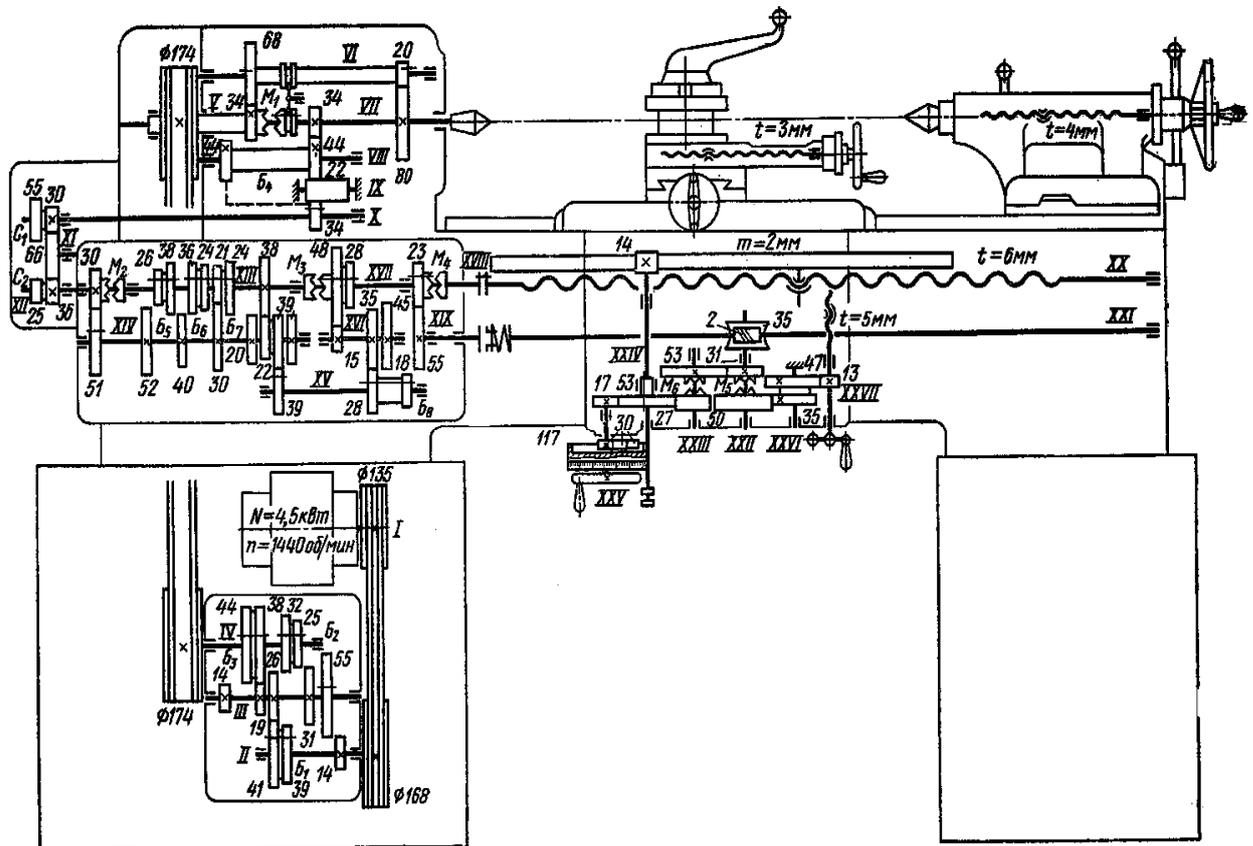


Рис. 10.9. Кинематическая схема токарно-винторезного станка 1А616

Движение с вала *I* электродвигателя ($N = 4,5$ кВт; $n = 1440$ об/мин) передается на вал *II* через клиноременную передачу с диаметрами шкивов 135–168 мм; на вал *III* – через зубчатые передачи 41–26, 39–31, 14–55. Вал *III* имеет три частоты вращения.

С вала *III* на вал *IV* движение передается через зубчатые передачи 14–44, 19–38, 26–32, 31–25. Вал *IV* имеет 12 частот вращения. Скорости переключаются блоками B_1 , B_2 , B_3 и зубчатым колесом $z = 55$, сидящими на валах на скользящих шпонках.

С вала *IV* движение клиноременной передачей с диаметрами шкивов 174–174 мм передается по лому валу *V*, а далее через зубчатые передачи 34–68 и 20–80 – на шпиндель *VII*. Переключением муфты M_1 влево вращение вала *V* передается шпинделю *VII*. Шпиндель станка имеет 24 частоты вращения (11–2240 об/мин).

Кинематическая цепь подачи. Цепь движения подачи суппортов станка начинается с вала *VII* (шпинделя). Движение с вала *VII* на вал *X* передается через реверсивный механизм зубчатыми передачами 34–44–22–34 или 34–44–44–34. Переключение колеса $z = 34$ на скользящей шпонке

реверсирует направление движения подач суппортов, с вала X движение передается на ведущий вал XII коробки подач через передачи 30–66–36.

Включением муфт M_2 и M_3 и переключением блоков B_5 , B_6 , B_7 и B_8 коробки подач движение с вала XII передается через соответствующие зубчатые передачи на ходовой валик XXI станка. Механизм коробки подач обеспечивает 48 частот вращения ходового валика. Однако вследствие близкого совпадения ряда частот вращения практически коробка подач обеспечивает только 22 частоты вращения ходового валика и, следовательно, 22 продольные или поперечные подачи.

С ходового валика XXI движение передается на вал $XXII$ фартука станка червячной передачей 2–35. Включением муфты M_6 движение передается с вала $XXII$ через зубчатые передачи 31–53 и 27–53 на вал $XXIV$, на котором жестко закреплено реечное зубчатое колесо $z = 14$. Реечное колесо, вращаясь, катится по зубчатой рейке, привернутой к станине станка, обеспечивая продольную подачу суппорта. Включением муфты M_5 движение передается с вала $XXII$ через передачи 50–35 и 47–13 на ходовой винт $XXVII$ поперечной подачи.

Кинематическая цепь нарезания резьбы. При нарезании резьб с шагом до 6 мм движение в коробку подач передается от шпинделя. Резьбы с более крупным шагом нарезают при включенном переборе с использованием звена увеличения шага. Для этого блок B_4 смещают вправо, пока зубчатое колесо $z = 44$ не войдет в зацепление с колесом $z = 34$, закрепленным на валу V . В этом случае движение в коробку подач передается от вала V ; с вала X на вал XII коробки подач – через блоки C_1 и C_2 сменных зубчатых колес.

При нарезании дюймовых резьб кулачковую муфту M_2 выключают. Колесо $z = 51$ зацеплено с колесом $z = 30$ вала XII , а колесо $z = 39$ вала XV введено в зацепление с колесом $z = 39$ блока 22–39, свободно сидящим на валу XIV . При нарезании метрических и модульных резьб включают муфту M_2 , колесо $z = 51$ выводят из зацепления, а колесо $z = 39$ перемещают по валу XV вправо до зацепления с колесом $z = 39$, жестко закрепленным на валу XIV . Суппорт станка при нарезании резьб получает движение от коробки подач через кулачковую муфту M_4 , промежуточный валик $XVIII$ и ходовой винт XX .

10.3. Обработка заготовок на станках токарной группы

Точение – лезвийная обработка резанием поверхностей вращения и торцевых поверхностей: главное движение (вращательное) придается заготовке; движение подачи (поступательное) придается режущему инструменту в направлении вдоль, перпендикулярно или под углом к оси вращения заготовки. Точением, или обтачиванием, называют обработку наружных поверхностей, обработку внутренних поверхностей называют *расточиванием*.

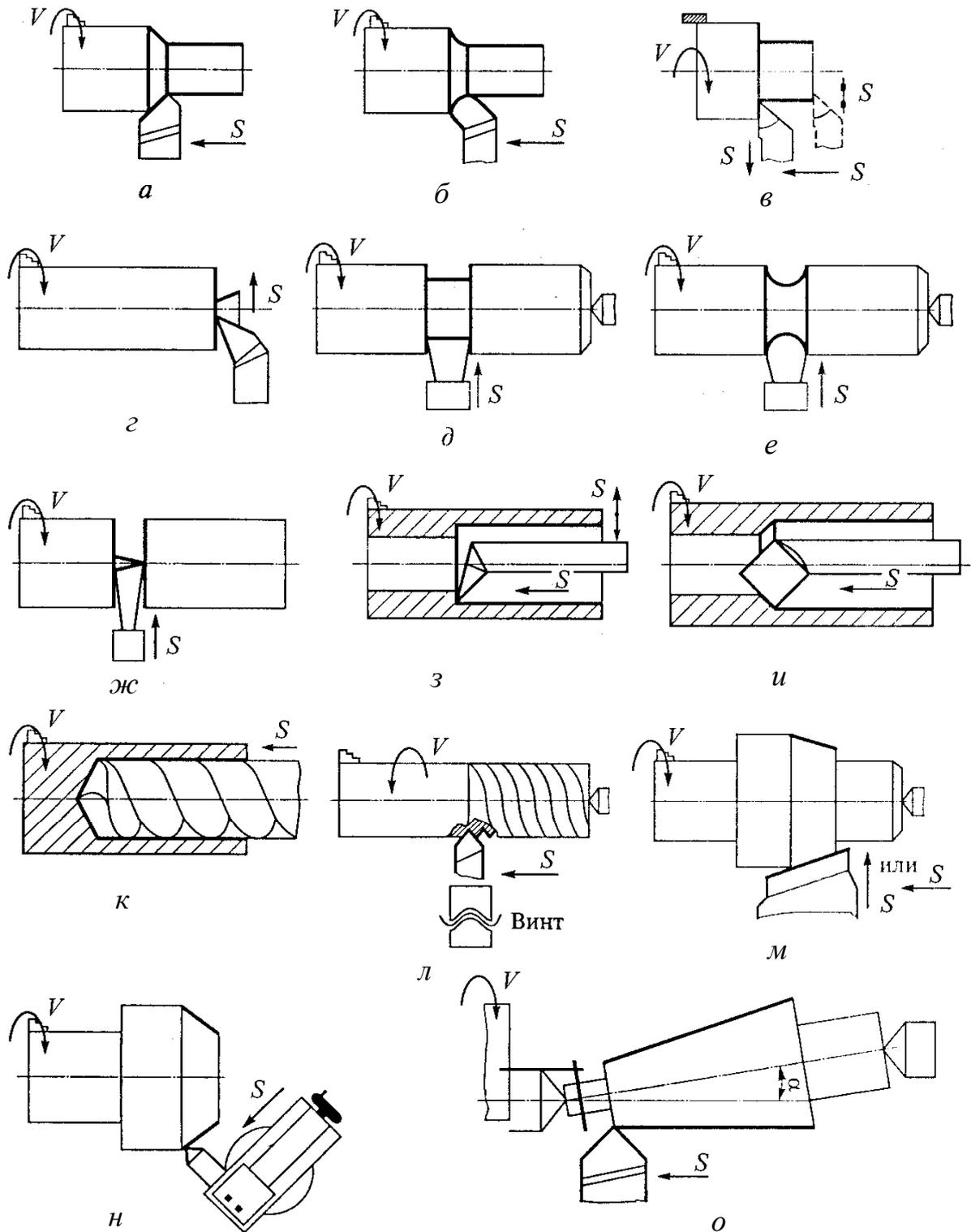


Рис. 10.10. Основные схемы обработки заготовок на универсальном токарно-винторезном станке: а–в – обтачивание наружных цилиндрических поверхностей; г – подрезание торцов; д, е – протачивание прямых и фасонных канавок соответственно; ж – отрезание; з, и – растачивание гладких и ступенчатых отверстий соответственно; к – сверление; л – нарезание резьбы; м – точение конусов с поперечной подачей; н, о – точение коротких и длинных конических поверхностей соответственно; α – угол поворота оси заготовки

10.3.1. Характеристика методов точения

Обтачивание цилиндрических поверхностей (рис. 10.10, а–в) производится прямыми или отогнутыми резцами с продольным движением подачи. При этом используют различные проходные резцы для того, чтобы получить разные по форме переходные поверхности. Обычно перед обтачиванием наружных поверхностей подрезают торцы заготовки (рис. 10.10, г).

Обработка производится подрезными резцами с поперечным движением подачи к центру или от центра заготовки. При подрезании к центру торец получается слегка вогнутым, при подрезании от центра торец получается слегка выпуклым, а шероховатость поверхности меньше.

Протачивание канавок (рис. 10.10, д, е) проводится с поперечным движением подачи специальными резцами, у которых форма и размеры главной режущей кромки соответствуют протачиваемой канавке. Отрезание обработанной детали (рис. 10.10, ж) проводится отрезными резцами с прямой или наклонной главной режущей кромкой. В последнем случае торец отрезанной детали получается более чистым. Растачивание внутренних цилиндрических поверхностей выполняют расточными резцами, закрепленными в резцедержателе в направлении оси заготовки, с продольной подачей. Растачивание гладких сквозных отверстий проводят проходными резцами (рис. 10.10, з), а ступенчатых и глухих – упорными расточными (рис. 10.10, и). Сверление, зенкерование и развертывание центральных отверстий (рис. 10.10, к) выполняют соответствующим режущим инструментом. Нарезание резьбы (рис. 10.10, л) проводится специальными резьбовыми резцами. Форма режущих кромок резцов определяется профилем и размерами поперечного сечения нарезаемой резьбы. Обработка конических поверхностей может проводиться несколькими способами. Широкими токарными резцами с продольным или поперечным движением подачи (рис. 10.10, м) получают поверхности с длиной образующей не более 30 мм или для снятия фасок. Перемещением инструмента под углом к оси вращения заготовки (рис. 10.10, н) ведут обработку с ручной подачей резца. Длина обрабатываемой таким способом образующей конуса не превышает 100–150 мм. Поворотом оси вращения заготовки на угол α не более 8° (рис. 10.10, о) обрабатывают длинные конические поверхности.

10.3.2. Токарные резцы

По технологическому назначению различают резцы:

проходные (рис. 10.11, а–в) – для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей;

подрезные (рис. 10.11, г) – для обтачивания плоских торцов;

расточные (рис. 10.11, д, е) – для растачивания сквозных и глухих отверстий;

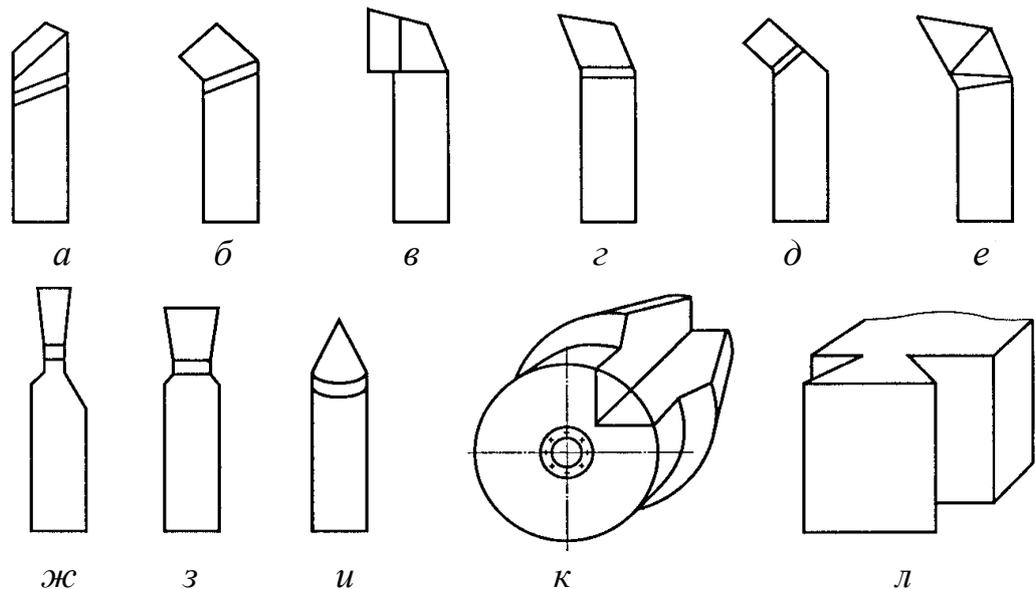


Рис. 10.11. Токарные резцы: *а* – проходной прямой; *б* – проходной отогнутый; *в* – проходной упорный отогнутый; *г* – подрезной; *д, е* – расточные для сквозных и глухих отверстий соответственно; *ж* – отрезной; *з* – канавочный; *и* – резьбовой; *к* – круглый фасонный; *л* – призматический фасонный

отрезные (рис 10.11, *ж*), прорезные, или канавочные (рис. 10.11, *з*), – для точения наружных кольцевых канавок;

резьбовые (рис. 10.11, *и*) – для нарезания резьбы;

фасонные круглые (рис. 10.11, *к*) и призматические (рис. 10.11, *л*) – для обработки фасонных поверхностей и т. д.

По форме головки различают прямые, отогнутые и оттянутые резцы.

По характеру обработки различают резцы для чернового, получистового и чистового точения.

По типу инструментального материала и способу его крепления на головке различают резцы:

цельные из углеродистых сталей (самокальные);

цельные из быстрорежущих сталей;

резцы с напаянной пластинкой из быстрорежущей стали;

из твердого сплава, с механическим креплением пластинки твердого сплава или кристалла сверхтвердого материала.

По виду пластины твердого сплава различают резцы с перетачиваемыми трех- и четырехгранными пластинами и с непетачиваемыми трех-, четырех-, пяти- и шестигранными пластинами.

10.3.3. Рабочие приспособления для токарной обработки

Характер базирования и закрепления заготовки в рабочих приспособлениях токарных станков зависит от типа станка, вида обрабатываемой поверхности, типа заготовки (вал, диск, кольцо, некруглый стержень), отношения длины заготовки к ее диаметру, требуемой точности обработки и т. д. При

обработке круглых стержней на универсальных токарных станках чаще всего применяется трех- или шестикулачковый самоцентрирующий патрон (рис. 10.12, а), состоящий из корпуса 1, в радиальных пазах которого перемещаются кулачки 3. В корпусе патрона размещена коническая зубчатая передача, на торце одного из конических колес выполнена канавка в виде спирали Архимеда. Кулачки также имеют выступы в виде спирали Архимеда. При вращении шестерни кулачки одновременно перемещаются к центру или от центра патрона, что обеспечивает центрирование заготовки 2 относительно оси вращения патрона. При необходимости установки заготовки эксцентрично относительно ее оси вращения применяют четырехкулачковый патрон, в котором каждый кулачок перемещается независимо от остальных. При отношении длины заготовки к ее диаметру от 4 до 10 консольное закрепление заготовки (только в патроне) неприменимо: необходима поддержка второго ее конца. В торце заготовки предварительно просверливают (специальным центровочным сверлом) коническое отверстие, в которое вставляют задний центр (рис. 10.12, б), выполненный с неподвижной или подвижной конусной частью.

Конусная часть неподвижного центра выполняется из легированных сталей или в виде вставки из твердого сплава. Центры с подвижной конусной частью применяют при точении с большими толщинами срезаемого слоя или при больших скоростях резания.

При обработке торца заготовки, установленной в центрах, применяют срезанный центр (рис. 10.12, в). При обточке конических поверхностей методом смещения задней бабки заготовку устанавливают в шариковом центре (рис. 10.12, г). При обработке некрупных заготовок последнюю устанавливают в обратных центрах (рис. 10.12, д). Часто заготовку базируют в двух центрах. В этом случае заготовку приводят во вращение хомутиком (рис. 10.12, е), который надевают на заготовку, а его загнутый конец упирают в кулачок токарного патрона. При установке переднего центра в токарном патроне коническую часть центра перед обработкой обязательно протачивают. При отношении длины заготовки к ее диаметру больше 10 заготовке необходима третья опора, в качестве которой применяют подвижные или неподвижные люнеты. Неподвижный люнет (рис. 10.12, ж) устанавливают на станине, подвижный – на продольных салазках суппорта. Для обработки заготовок на станках с полуавтоматическим или автоматическим циклом применяют цанговые патроны. На рис. 10.12, з показан цанговый патрон для базирования и закрепления заготовки по отверстию. Заготовка 2 устанавливается на корпусе 1, имеющем упругие лепестки с внутренним конусом. При осевом перемещении конуса 4 лепестки зажимают заготовку.

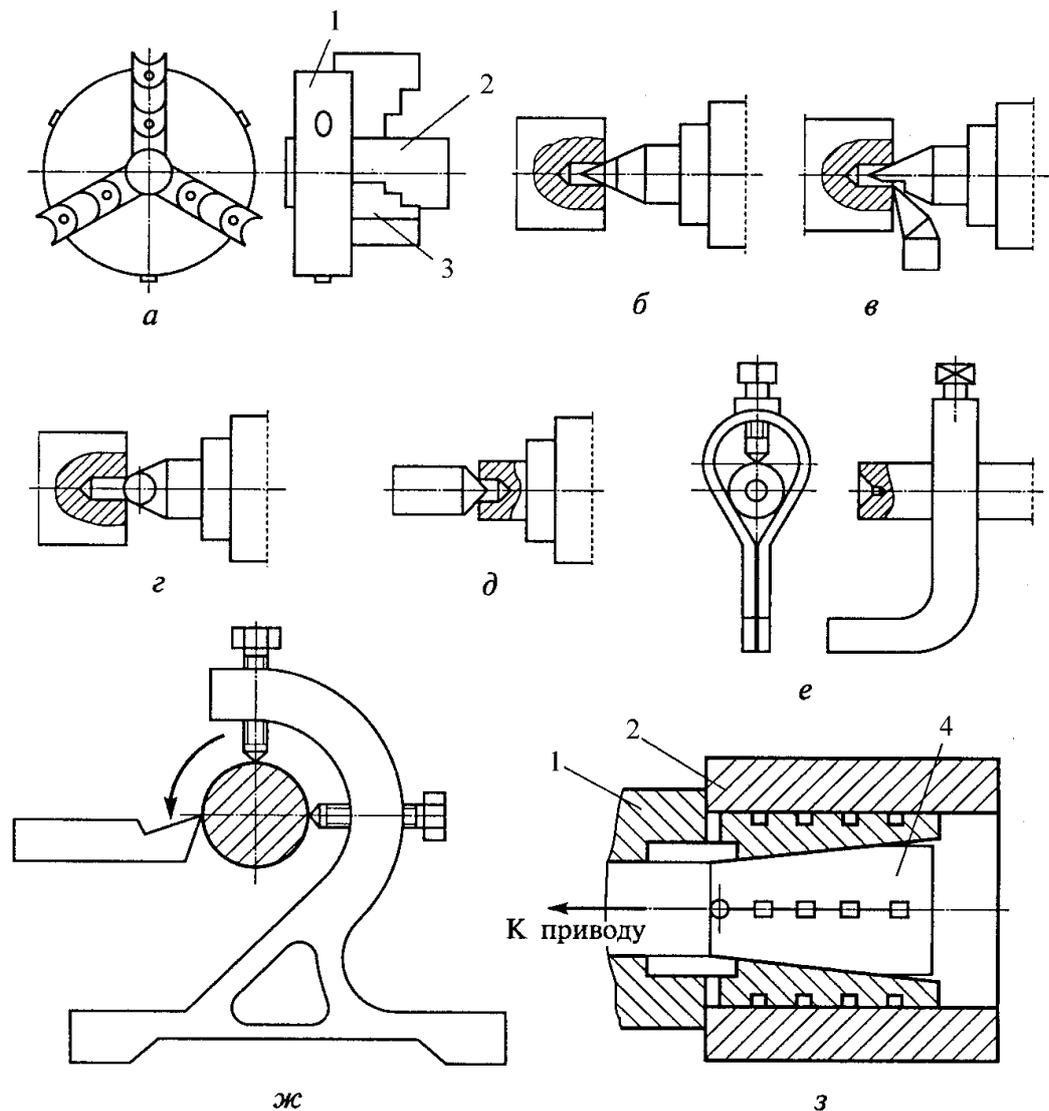


Рис. 10.12. Рабочие приспособления, применяемые в токарных станках: *а* – трех- кулачковый патрон; *б* – неподвижный центр; *в* – срезанный центр; *г* – шариковый центр; *д* – обратный центр; *е* – хомутик; *ж* – неподвижный люнет; *з* – цанговый патрон; *1* – корпус; *2* – заготовка; *3* – кулачки; *4* – конус

Привод патрона может быть механическим (винтовой или пружинный), гидравлическим или пневматическим. Для базирования и закрепления нежестких втулок по отверстию применяют патроны и различные оправки (цилиндрические с запрессовкой заготовки, конические, упругие с гидропластмассой, тарельчатыми пружинами, гофрированными втулками и т. д.).

10.3.4. Станки токарной группы и примеры обработки заготовок

Универсальный токарно-винторезный станок (рис. 10.13) используется для обработки деталей различных классов (круглые и некруглые стержни, кольца, диски, корпусные детали). Станок имеет станину 18 – массивную базовую чугунную деталь на двух тумбах. В передней тумбе 16 установлен главный электродвигатель, в задней 12 – насос и резервуар для СОТС.

Верхняя часть станины имеет две пары направляющих для базирования и перемещения подвижных элементов станка. Передняя бабка *1* закреплена на левой части станины. В корпусе передней бабки расположена коробка скоростей и шпиндель *2*, представляющий собой полый вал, на правом резьбовом конце которого устанавливается технологическая оснастка для базирования и закрепления заготовок (трехкулачковый патрон *3*, планшайба и т. д.). Шпиндель получает вращение (главное движение) от главного электродвигателя через клиноременную передачу, систему зубчатых колес и муфт, размещенных на валах коробки скоростей, расположенной внутри передней бабки. Задняя бабка *8* установлена на правой части станины с возможностью перемещения по ее внутренним направляющим. Внутри задней бабки размещена выдвигная пиноль *7*, в конусное отверстие которой вставляются различные центры (неподвижный, вращающийся, плавающий, центр-пробка). При обработке коротких заготовок, заготовок типа «некруглый стержень» или корпусных заготовок в конусное отверстие пиноли устанавливается осевой инструмент (сверло, зенкер, развертка), что позволяет производить осевую обработку центрального отверстия в заготовке. Движение подачи при этом осуществляется вручную вращением маховичка задней бабки. На паре наружных направляющих станины размещается суппорт, состоящий из резцедержателя *5*, поворотных салазок *4*, поперечных салазок *6*, продольных салазок *14* и фартука *15*. В четырехпозиционном резцедержателе устанавливаются режущие инструменты – токарные резцы. Поворотные салазки установлены с возможностью поворота и фиксации вокруг вертикальной оси, что позволяет обрабатывать короткие (до 150 мм) конусные поверхности с большими углами конусности (до 45°). При обработке длинных конусных поверхностей с малыми углами конусности (до 5°) смещают ось вращения заготовки, перемещая заднюю бабку перпендикулярно направляющим станины. Поперечные салазки позволяют придать режущему инструменту движение подачи *S* под углом 90° к оси вращения заготовки (поперечная подача). Продольные салазки позволяют придать режущему инструменту движение подачи *S* под углом 0° к оси вращения заготовки (продольная подача). Движение подачи осуществляется вручную или автоматически.

На передней стенке станины закреплена коробка подач, кинематически связанная с шпинделем системой зубчатых колес, установленных в гитаре подач *17*. Коробка подач передает движение на ходовой вал *10* и ходовой винт *11*, служащий для обеспечения автоматической подачи только при нарезании резьбы (для обеспечения автоматической подачи при других работах служит ходовой вал). Для преобразования вращения ходового вала или ходового винта в прямолинейное перемещение служат механизмы, размещенные в фартуке *15* (механизм типа «винт – гайка» для поперечной или продольной подачи при резьбонарезании, механизм типа «рейка – колесо» для других работ). При этом рейка *9* установлена на передней части станины. Для сбора стружки и СОТС в нижней части станины установлен поддон *13*.

Универсальный токарно-винторезный станок позволяет установить не более пяти режущих инструментов (четыре в резцедержателе и один в пиноли задней бабки). Для изготовления партии деталей с большим объемом токарной обработки универсальные станки малопригодны, так как требуется много времени на установку и наладку режущего инструмента.

Токарно-револьверные станки применяют для обработки партии сложных деталей типа «ступенчатый валик», «фланец», «кольцо». В таком станке несколько режущих инструментов устанавливают в револьверной головке, что позволяет сократить время на установку и наладку инструментов.

В *прутковых револьверных станках* заготовку (пруток различного сечения) зажимают в пустотелом цанговом патроне. После изготовления детали ее отрезают, протягивают оставшуюся часть прутка через полое осевое отверстие цангового патрона и обрабатывают следующую деталь.

В *патронных револьверных станках* обрабатывают штучные заготовки, зажимая их в кулачковом патроне станка.

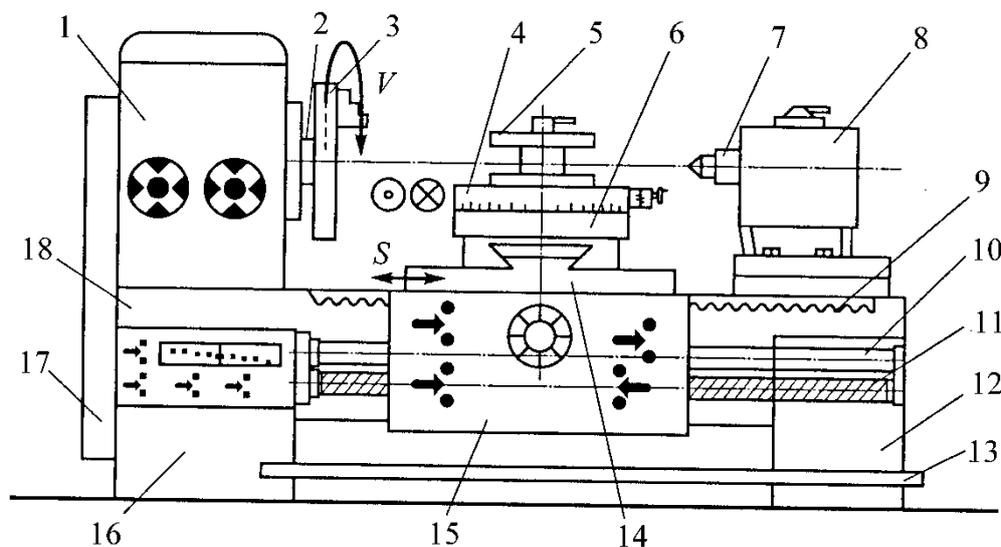


Рис. 10.13. Универсальный токарно-винторезный станок: 1 – передняя бабка; 2 – шпиндель; 3 – трехкулачковый патрон; 4 – поворотные салазки; 5 – резцедержатель; 6 – поперечные салазки; 7 – пиноль; 8 – задняя бабка; 9 – рейка; 10 – ходовой вал; 11 – ходовой винт; 12 – задняя тумба; 13 – поддон; 14 – продольные салазки; 15 – фартук; 16 – передняя тумба; 17 – гитара подач; 18 – станина

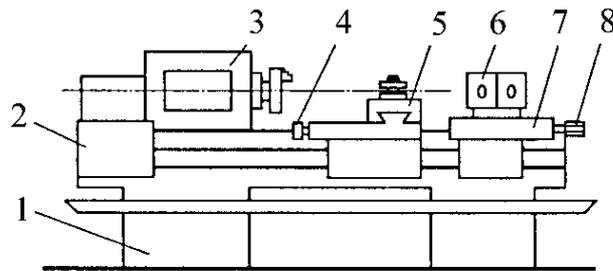


Рис. 10.14. Патронный токарно-револьверный полуавтомат: 1 – станина; 2 – коробка подач; 3 – передняя бабка; 4 – барабан передних упоров; 5 – поперечный суппорт; 6 – револьверная головка; 7 – револьверный суппорт; 8 – барабан задних упоров

Револьверные станки с многогранной револьверной головкой дополнительно оснащены одним или двумя (передним и задним) поперечными суппортами. Все инструменты, работающие с продольным движением подачи, закрепляются в револьверной головке. Все инструменты, работающие с поперечным движением подачи, закрепляются в суппортах. Станки с круглой револьверной головкой поперечных суппортов не имеют. При необходимости поперечное движение подачи осуществляется за счет медленного вращения револьверной головки вокруг горизонтальной оси.

На [рис. 10.14](#) показан патронный револьверный станок с многогранной головкой. Он состоит из станины 1, передней бабки 3 (с коробкой скоростей) и коробки подач 2, размещенной на лицевой стороне станины, поперечного суппорта 5, револьверного суппорта 7 с револьверной головкой 6, барабанов передних 4 и задних упоров 8.

Повышение производительности обработки достигается за счет параллельной работы суппортов и предварительной настройки станка по упорам барабанов 4 к барабанам 8. Настройка станка по упорам позволяет автоматически выдерживать диаметры и длины обрабатываемых поверхностей заготовок.

Токарные гидрокопировальные автоматы ([рис. 10.15](#)) применяют для обработки ступенчатых валов (для этих целей используют также много-резцовые токарные полуавтоматы и автоматы). Токарный гидрокопировальный автомат состоит из станины 1, передней бабки 2 с коробкой скоростей и шпинделем 3, верхней 4 и нижней 8 траверс. Задний конец заготовки поддерживается центром, установленным в пиноли 6, по траверсам перемещаются верхний 5 и нижний 7 суппорты.

Верхний суппорт имеет только поперечное движение подачи, нижний – только продольное (в гидрокопировальных автоматах суппорт перемещается по копиру, что позволяет обрабатывать сложные ступенчатые или фасонные поверхности).

10.3. Обработка заготовок на станках токарной группы

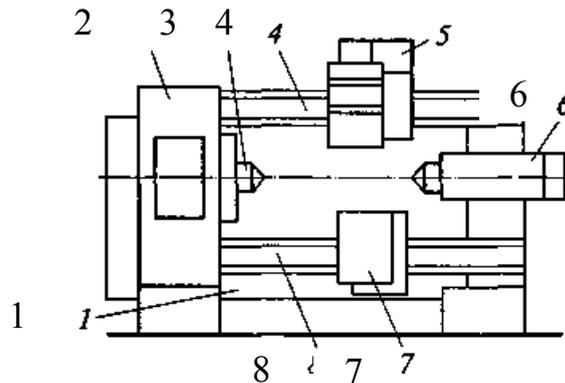


Рис. 10.15. Токарный гидрокопировальный автомат: 1 – станина; 2 – передняя бабка; 3 – шпиндель; 4 – верхняя траверса; 5 – верхний суппорт; 6 – пиноль; 7 – нижний суппорт; 8 – нижняя траверса

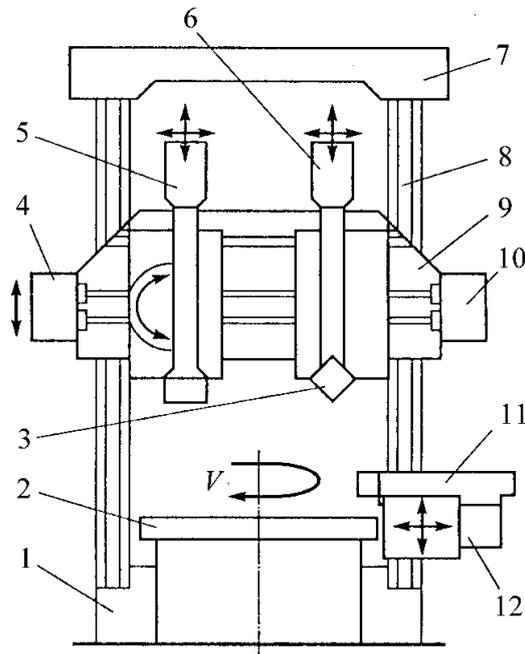


Рис. 10.16. Токарно-карусельный полуавтомат: 1 – станина; 2 – карусель; 3 – револьверная головка; 4, 10, 12 – коробки подач; 5 – верхний суппорт; 6 – револьверный суппорт; 7 – поперечина; 8 – стойка; 9 – траверса; 11 – боковой суппорт

Токарно-карусельные станки. Обработка массивных цилиндрических заготовок с отношением длины заготовки к ее диаметру 0,3–0,4 ведется на токарно-карусельных станках. Станок (рис. 10.16) состоит из станины 1, двух вертикальных стоек 8, соединенных поперечиной 7; на станине установлена карусель 2 с кулачковым патроном, по направляющим стоек перемещается траверса 9. По направляющим траверсы перемещаются верхний суппорт 5 с коробкой подач 4 и револьверный суппорт 6 с коробкой подач 10. На револьверном суппорте установлена револьверная головка 3. На правой стойке установлен боковой суппорт 11 с коробкой подач 12.

Многошпиндельные токарные автоматы. Для массовой обработки заготовок сложной формы применяются одношпиндельные горизонтальные автоматы (рис. 10.19, е). При необходимости обработки большой партии

несложных валиков применяются многошпиндельные токарные автоматы параллельной обработки. Если в качестве заготовки используется пруток, применяют прутковые автоматы, если штучная заготовка – магазинные. В последних заготовки укладываются в специальных емкостях – магазинах-накопителях. На рис. [10.17, а](#) показан четырехшпиндельный прутковый автомат параллельного действия. На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 5 стойки, соединенные траверсой 4. На торце передней стойки установлен шпиндельный блок 3 с четырьмя шпинделями. На торце задней стойки установлены упоры 6 (их количество равно количеству шпинделей). Автомат одновременно обрабатывает четыре одинаковые заготовки. Ведется обработка только наружных поверхностей заготовок с поперечным движением подачи суппортов. Прутки базируются и зажимаются в цанговых патронах. Величина вылета прутков ограничивается упорами задней стойки.

Партию детали со сложной конфигурацией наружной и внутренней поверхностей можно обработать на многошпиндельных автоматах последовательного действия. На рис. [10.17, б](#) показан многошпиндельный горизонтальный автомат последовательного действия. На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 9 стойки, соединенные траверсой 4. На передней стойке установлен шпиндельный блок 3, который имеет возможность дискретного поворота вокруг собственной оси. Напротив каждого шпинделя установлены поперечные суппорты 7. Между стойками установлен осевой суппорт 8 с каретками, расположенными соосно с шпинделями.

Режущие инструменты, работающие с поперечным движением подачи (резцы прорезные, подрезные, фасонные и др.), устанавливаются в зажимных устройствах поперечного суппорта. Режущие инструменты, работающие с продольным движением подачи (осевой инструмент, резцы расточные, проходные и др.), устанавливаются в зажимных устройствах продольного суппорта. При каждом повороте шпиндельного блока зажатый в шпинделе пруток занимает очередную рабочую позицию. На каждой позиции производится частичная обработка поверхностей заготовки. Переходя от первой до последней рабочей позиции, заготовка подвергается полной обработке. Таким образом, на рабочих позициях станка обрабатывается несколько заготовок.

Аналогичный принцип, но для обработки дисков с отношением высоты к диаметру 0,3–0,4 применен в вертикальных многошпиндельных полуавтоматах ([рис. 10.18, а](#)). На станине 1 установлены центральная колонна 5 и карусель 3, которая имеет возможность дискретного или непрерывного поворота вокруг оси колонны. При непрерывном вращении карусели вместе с ней синхронно вращается колонна. На карусели установлены шпиндели 2 с кулачковыми патронами. По вертикальным направляющим 4 колонны перемещаются суппорты 6.

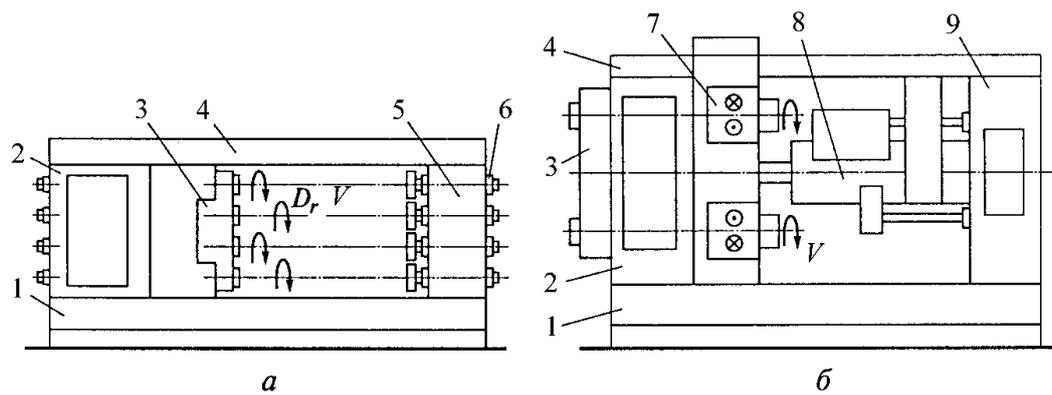


Рис. 10.17. Горизонтальные токарные автоматы: *а* – четырехшпindelный параллельного действия; *б* – многшпindelный последовательного действия; 1 – станина; 2 – передняя стойка; 3 – шпindelный блок; 4 – траверса; 5, 9 – задние стойки; 6 – упоры; 7 – поперечный суппорт; 8 – осевой суппорт

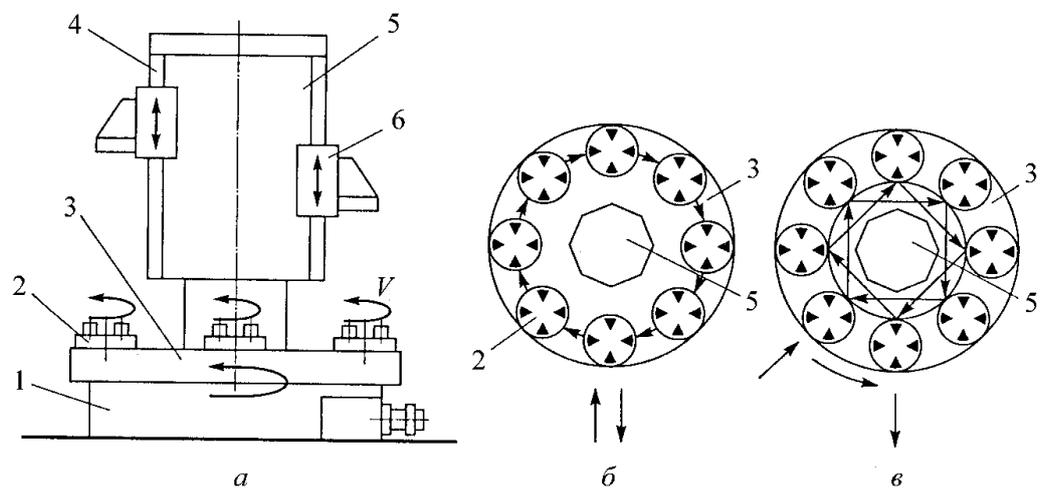


Рис. 10.18. Вертикальный многшпindelный полуавтомат: *а* – компоновка станка; *б* – одинарная индексация карусели; *в* – двойная индексация карусели; 1 – станина; 2 – шпindel; 3 – карусель; 4 – вертикальные направляющие; 5 – центральная колонна; 6 – суппорты

При дискретном вращении карусели возможны два исполнения станка: с одинарной (рис. 10.18, б) и с двойной (рис. 10.18, в) индексацией карусели. На станках с одинарной индексацией проводится односторонняя обработка заготовки. На первой позиции проводится загрузка заготовки, далее после каждого поворота карусели обрабатывается группа поверхностей, затем обработанная деталь возвращается на первую позицию, где снимается со станка. На одном станке одновременно обрабатывается 7 заготовок.

На станках с двойной индексацией карусель поворачивается на двойной угловой шаг. Первая позиция загрузочная. Далее на нечетных позициях ведется обработка заготовки с одной стороны. Полуобработанная заготовка возвращается на первую позицию, где вручную или с помощью автооператора переносится на вторую загрузочную позицию и базируется по

обработанным поверхностям. На четных позициях заготовка обрабатывается с другой стороны и снимается со станка. Таким образом на станке ведется полная обработка заготовок с двух сторон.

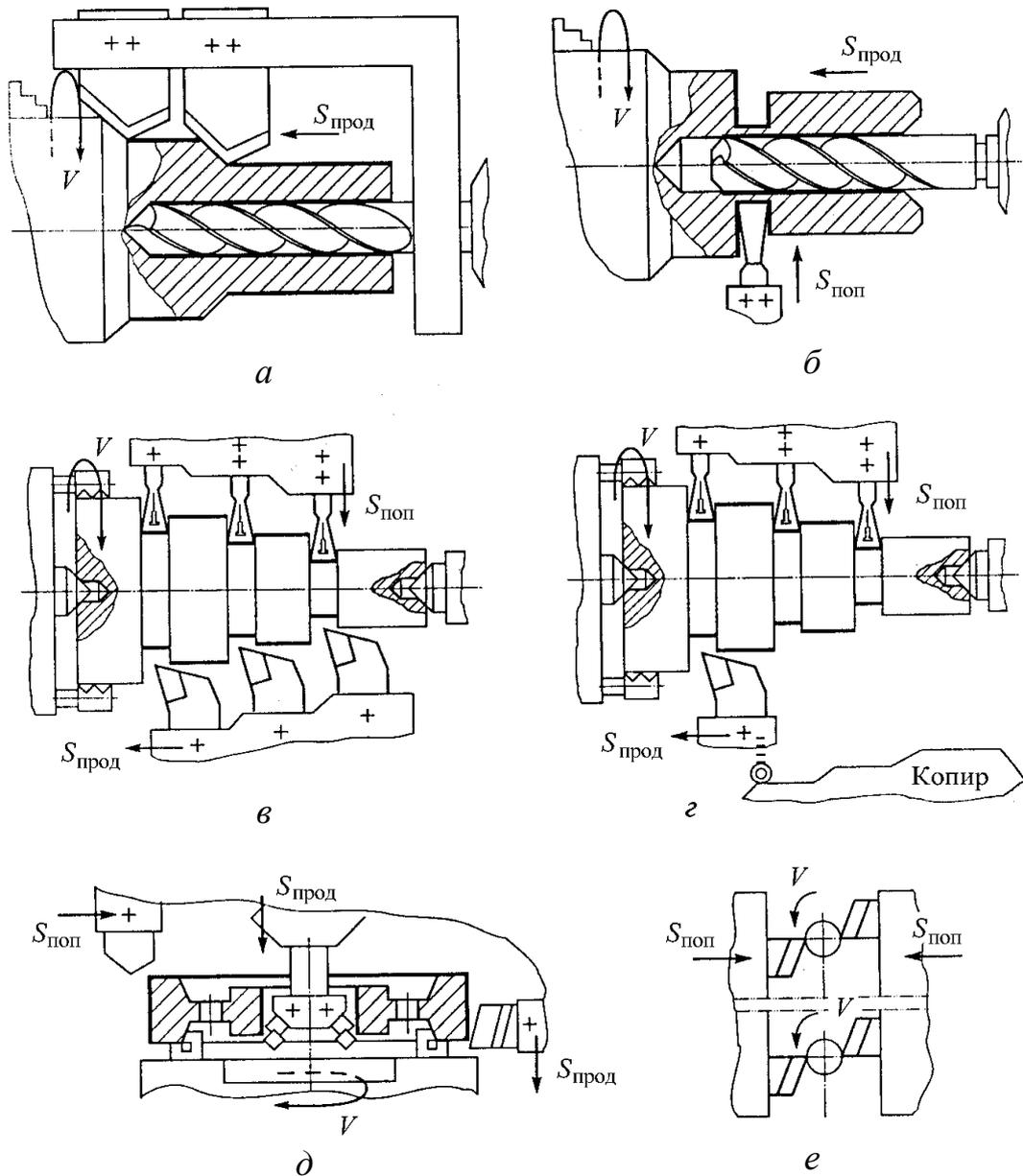


Рис. 10.19. Примеры наладок на станках токарной группы: *a, б* – на токарно-револьверном станке; *в* – на горизонтальном одношпиндельном автомате; *г* – на гидрокопировальном автомате; *д* – на вертикальном многошпиндельном автомате; *е* – на горизонтальном многошпиндельном автомате

Эскизы наладок (установок инструментов и заготовок) различных станков приведены на [рис. 10.19](#).

10.3.5. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на станках токарной группы

Под технологичностью любого объекта понимается соответствие свойств этого объекта конкретным условиям его производства, эксплуатации и ремонта. Следовательно, *технологичность любой конструкции* – это совокупность свойств, обеспечивающих оптимальность затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке ее производства, изготовлении, эксплуатации и ремонта.

Деталь, обрабатываемая на станках токарной группы, должна удовлетворять следующим технологическим требованиям (рис. 10.20).

Масса детали должна быть уравновешена относительно ее оси вращения. Число поверхностей детали, имеющих форму тел вращения, должно быть максимально. Желательно, чтобы обрабатываемые поверхности не имели разрывов (шпоночные пазы, лыски). Вращение неуравновешенной детали, точение прерывистых поверхностей приводят к возбуждению колебаний в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД), что отрицательно сказывается на стойкости режущего инструмента и снижает точность обработки.

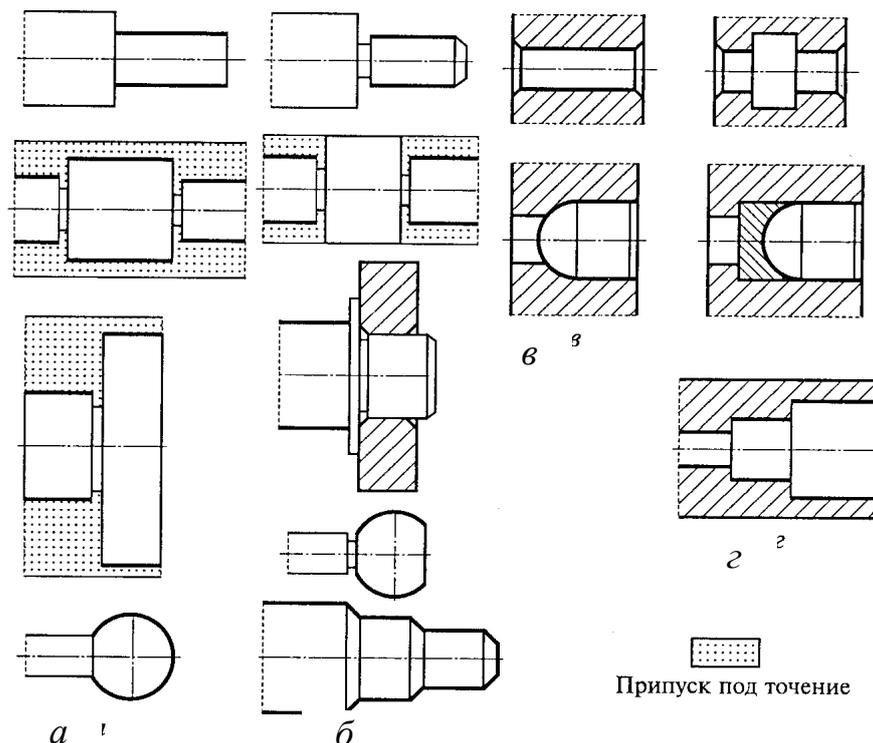


Рис. 10.20. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на токарных станках: *а* – нетехнологичные решения при обработке валов; *б* – технологичные решения при обработке валов; *в* – нетехнологичные решения при обработке отверстий; *г* – технологичные решения при обработке отверстий

При конструировании детали необходимо использовать нормальный ряд диаметров и длин, что позволит применить стандартные режущие

инструменты. Следует избегать применения нежестких элементов в конструкции детали (длинные и тонкие шейки, тонкостенные втулки). Точение нежестких заготовок не обеспечивает необходимой точности обработки и требует применения специальных приспособлений (люнетов, многолепестковых цанг). Целесообразна унификация элементов детали (одинаковые размеры фасок, радиусов закруглений, канавок), что позволяет выполнять одинаковые элементы одним режущим инструментом.

Желательно, чтобы обработанная поверхность в начале имела фаску для постепенного врезания режущего инструмента и заканчивалась кольцевой канавкой для свободного выхода режущего инструмента.

Неответственные поверхности, не сопрягаемые с поверхностями других деталей, можно не обрабатывать – это снижает трудоемкость обработки детали в целом. Обработка деталей с большими перепадами диаметров приводит к неоправданно большим объемам срезаемой стружки или к применению сложных, дорогостоящих заготовок.

Желательно расчленить конструкцию детали: отдельно выполнять вал с шейкой, отдельно – кольцо. Затем кольцо нужно напрессовать на шейку и при необходимости произвести совместную чистовую обработку.

Целесообразно заменять сложные фасонные поверхности более простыми. Между фасонной и цилиндрической поверхностями необходимо предусматривать переходную канавку. Точные внутренние отверстия во втулках нужно выполнять с внутренней выточкой – это позволит расточить отверстие с одной установки и одним расточным резцом. Обработка точных глухих отверстий затруднительна, лучше заменять их на сквозные. Затруднительна обработка фасонного дна отверстий, поэтому применение вставного дна значительно упростит обработку.

Ступенчатые поверхности детали желательно выполнять с постепенным увеличением (у валов) или уменьшением (у отверстий) диаметров по длине детали. Длины ступеней должны быть одинаковыми или кратными длине самой короткой ступени – это упрощает наладку станка при обработке на многорезцовых автоматах или полуавтоматах. В торцах валов, обрабатываемых в центрах, необходимо предусматривать центровые технологические отверстия.

Желательно избегать обработки ребристых поверхностей. Участки, имеющие один размер, но разные допуски, необходимо разграничивать кольцевыми канавками. Острые грани обработанных поверхностей должны быть притуплены или скруглены. Поверхности шеек валов, сочленяемых с отверстиями сопрягаемой детали, должны иметь заходные конусы (фаски).

10.4. Обработка заготовок на сверлильных станках

Сверление – лезвийная обработка резанием отверстий осевым инструментом; главное движение, вращательное, и движение подачи, прямолинейное, придаются инструменту.

10.4.1. Схемы обработки поверхностей на станках сверлильной группы

На сверлильных станках производят сверление, рассверливание, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, обработку ступенчатых отверстий и нарезание внутренних резьб. Сверлением (рис. 10.21, а) получают сквозные и глухие отверстия. Рассверливанием (рис. 10.21, б) увеличивают диаметр ранее просверленного отверстия. Зенкерованием (рис. 10.21, в) также увеличивают диаметр отверстия, но по сравнению с рассверливанием зенкерование позволяет получить бóльшую точность и производительность обработки.

Зенкерованием можно обрабатывать отверстия, полученные в заготовке литьем или давлением. Развертывание (рис. 10.21, г) – чистовая операция, обеспечивающая высокую точность отверстия. Развертыванием обрабатывают цилиндрические и конические отверстия после зенкерования или растачивания. Зенкованием (рис. 10.21, д, е) обрабатывают цилиндрические и конические углубления под головки болтов и винтов. Для обеспечения перпендикулярности и соосности обработанной поверхности основному отверстию режущий инструмент (зенковку) снабжают направляющим цилиндром (рис. 10.21, д). Цекованием (рис. 10.21, ж, з) обрабатывают торцевые опорные плоскости для головок болтов, винтов и гаек. Перпендикулярность обработанной торцевой поверхности основному отверстию обеспечивает направляющий цилиндр режущего инструмента (цековки). Центровочным сверлом (рис. 10.21, и) обрабатывают центровые базовые отверстия в валах. Внутреннюю резьбу обрабатывают метчиками (рис. 10.21, к). При этом скорость движения подачи должна быть равна шагу резьбы ($S_0 = h$). Сложные поверхности обрабатывают комбинированным инструментом (рис. 10.21, л).

Схема обработки точного конического отверстия следующая: сверление цилиндрического отверстия; зенкерование ступенчатым коническим зенкером (рис. 10.22, а); развертывание конической разверткой со стружко-разделительными канавками (рис. 10.22, б); развертывание гладкой конической разверткой (рис. 10.22, в).

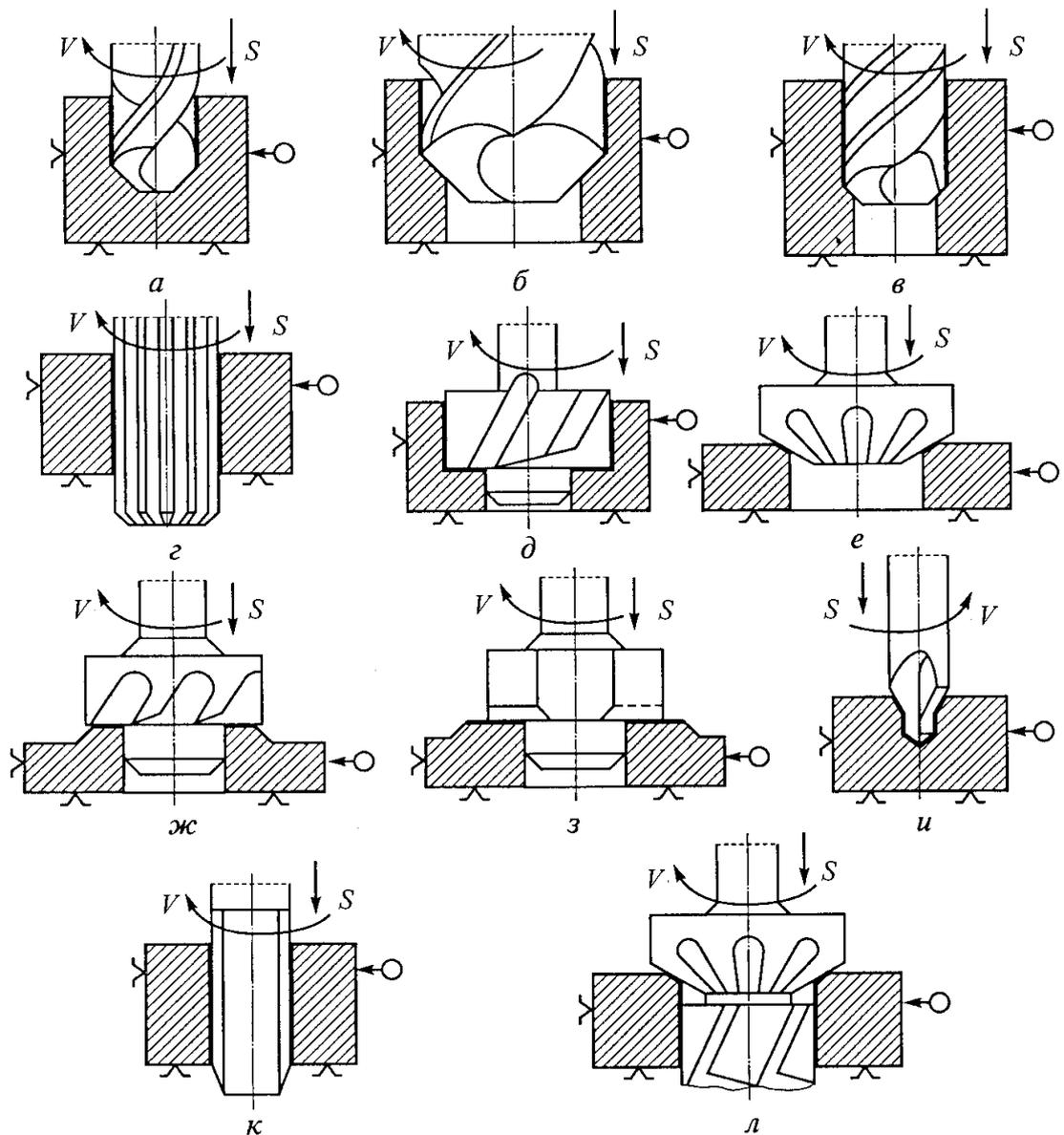


Рис. 10.21. Схемы обработки поверхностей на сверлильных станках: *a* – сверление; *б* – рассверливание; *в* – зенкерование; *г* – развертывание; *д, е* – зенкование; *ж, з* – цекование; *и* – обработка базовых центровых отверстий; *к* – нарезание внутренних резьб; *л* – обработка сложных поверхностей

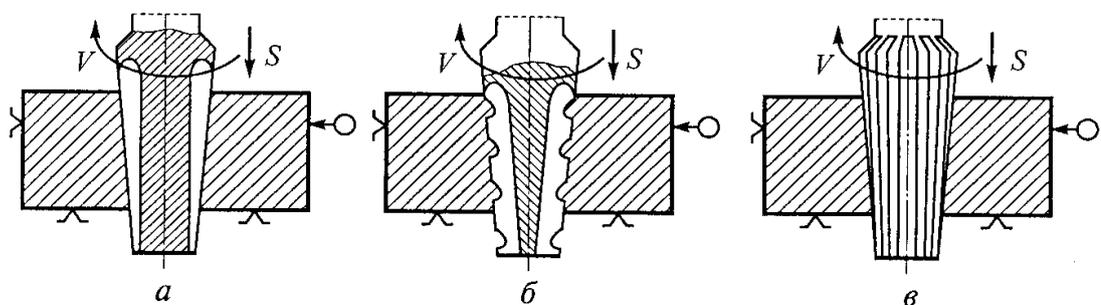


Рис. 10.22. Обработка точных конических отверстий: *a* – зенкерование ступенча-тым зенкером; *б* – черновое развертывание; *в* – чистовое развертывание

Части, элементы и геометрия осевого инструмента. Сверла бывают спиральные, перовые, для глубокого сверления (шнековые, кольцевые, ружейные, пушечные), центровочные и комбинированные (специальные).

Спиральное сверло (рис. 10.23, а) имеет рабочую часть 9 и хвостовик 7, который служит для закрепления сверла в рабочем приспособлении станка и выполняется цилиндрическим или коническим. Конический хвостовик снабжен лапкой 6, предохраняющей его при выбивании сверла из шпинделя станка. Рабочая часть сверла выполняется из инструментальной стали или с напайными пластинками твердого сплава. Она осуществляет процесс резания, формирует поверхность обрабатываемого отверстия, отводит стружку из зоны резания и направляет сверло при обработке. Рабочая часть 9 состоит из направляющей 8 и режущей 10 частей. Направляющая часть имеет две винтовые канавки 5, необходимые для отвода стружки из зоны резания, и две ленточки 4, необходимые для направления сверла. Режущая часть имеет две главные режущие кромки 11, образованные передними 1 и главными задними 3 поверхностями. Главные режущие кромки соединяются под углом 2φ поперечной кромкой 2. От значения угла 2φ зависят толщина и ширина срезаемого слоя, соотношение между радиальной и осевой составляющими силы резания и температура в зоне резания.

С увеличением угла 2φ возрастает осевая P_x и уменьшается радиальная P_r составляющие силы резания. Ширина срезаемого слоя при этом уменьшается, что повышает температуру в зоне резания. С изменением угла 2φ изменяются значения углов α и γ и форма главных режущих кромок. Рекомендуемые значения угла 2φ приведены в табл. 10.3.

Передний угол γ измеряют в главной секущей плоскости, проходящей перпендикулярно главной режущей кромке. Задний угол α измеряют в плоскости, проходящей через точку главной режущей кромки параллельно оси сверла. От периферии сверла к центру угол γ уменьшается, а угол α увеличивается. Передний угол поперечной кромки отрицателен и равен примерно минус 60° , следовательно, поперечная кромка сминает и скоблит обрабатываемый материал, что резко повышает силу резания. Поэтому для уменьшения влияния поперечной кромки на процесс резания обработку отверстий большого диаметра рационально проводить в два этапа: сверление отверстия сверлом меньшего диаметра и рассверливание отверстия сверлом нужного диаметра.

Ленточка сверла служит для центрирования сверла по обработанной поверхности и обеспечивает возможность его многократной переточки. Ширина ленточек промышленных сверл 0,2–3 мм. По ленточке сверло имеет обратную конусность 0,03–0,12 мм на 100 мм длины.

Перовые сверла (рис. 10.23, б) значительно проще и дешевле в изготовлении, чем спиральные, жесткость их несколько выше. Они предназначены для обработки сравнительно коротких отверстий. Рабочая часть сверла выполняется в виде тонкой пластины с двумя режущими кромками, расположенными относительно друг друга под углом 2φ , который равен 116 – 118° . Передний угол γ у перовых сверл отрицательный и с увеличением толщины

пера увеличивается. Задний угол получают одноплоскостной подточкой задней поверхности. Обычно угол α равен 10–15°. Цельные перовые сверла из быстрорежущей стали применяются в приборостроении, для обработки отверстий диаметром до 14 мм в деталях из латуни, бронзы, пластмасс. Сборные перовые сверла, оснащенные пластинами твердого сплава, применяются для обработки отверстий диаметром 20–130 мм в деталях из конструкционных сталей и чугунов на сверлильных, фрезерных и расточных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

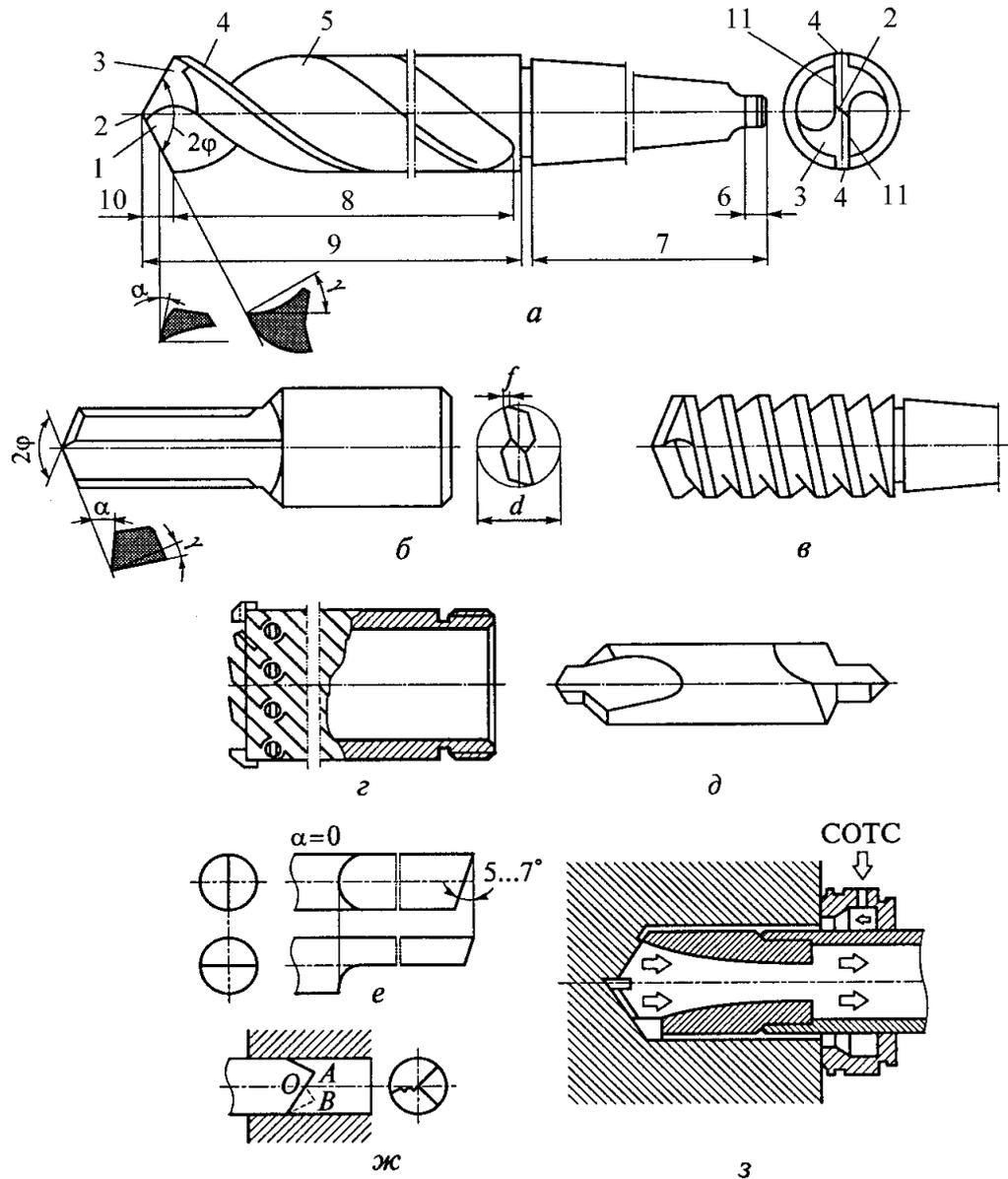


Рис. 10.23. Сверла: *a* – спиральное: 1 – передняя поверхность; 2 – поперечная кромка; 3 – главная задняя поверхность; 4 – ленточка; 5 – винтовая канавка; 6 – лапка; 7 – хвостовик; 8 – направляющая часть; 9 – рабочая часть; 10 – режущая часть; 11 – главная режущая кромка; *b* – перовое; *v* – шнековое; *z* – кольцевое; *d* – центровочное; *e* – пушечное; *ж* – ружейное; *z* – эжекторное; *d* – диаметр сверла; *f* – ленточка; α , γ , ϕ – углы резания

Таблица 10.3

Рекомендуемые значения угла при вершине реза

Обрабатываемый материал	2φ, град
Сталь углеродистая конструкционная	116–120
Нержавеющая сталь, высокопрочная сталь, жаропрочные сплавы	125–130
Титановые сплавы	140
Чугун средней твердости, твердая бронза	90–100
Чугун твердый	120–125
Латунь, алюминиевые сплавы	130–140
Медь	125
Пластмассы	80–110
Бетон, мрамор	80–90

Шнековые сверла (рис. 10.23, в) выполняются с большим углом наклона винтовых канавок (до 60°), что позволяет сверлить отверстия с отношением длины к диаметру до 30 за один проход без периодического вывода сверла из отверстия для удаления стружки. Промышленные сверла имеют диаметр 5–14 мм. Эти сверла выполняются с плоской заточкой передних и задних поверхностей. Для обработки чугуна и конструкционных сталей рекомендуются значения: $2\phi = 118^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\gamma = 15^\circ$.

Для экономии работы, затрачиваемой на сверление при больших диаметрах сверления и при сверлении глубоких отверстий, применяются *кольцевые сверла* (рис. 10.23, з), при работе с которыми в стружку превращается лишь кольцевая выборка, а сердцевина металла остается нетронутой.

Центровочные сверла (рис. 10.23, д) позволяют одновременно обрабатывать цилиндрическую и коническую части центровочных отверстий. Промышленностью выпускаются сверла с углом базового конуса центрового отверстия 60 и 75°, с двойным базовым конусом 60 и 120°, с радиусной базовой поверхностью. Режущая часть сверл образована двумя прямыми, наклонными или винтовыми канавками и состоит из цилиндрического и конического участков. Цилиндрический участок имеет те же части, что и спиральное сверло (рис. 10.23, а): две режущие кромки, расположенные под углом $2\phi = 118^\circ$, и поперечную кромку. Задние поверхности цилиндрической и конической частей имеют углы соответственно 11 и 6°. На цилиндрической части отсутствуют ленточки.

Пушечные сверла (рис. 10.23, е) предназначены для сверления глубоких отверстий с отношением длины к диаметру до 50. Они представляют собой длинный стержень, срезанный на конце по диаметру. Половина цилиндрического тела сверла является направляющей, обеспечивающей прямолинейность оси обрабатываемого отверстия. Часто на поверхности сверла ставят продольные дубовые бруски для уменьшения трения.

Ружейные сверла (рис. 10.23, ж) используют для сверления глубоких отверстий при высоких требованиях к точностным характеристикам обработанной поверхности. Они представляют собой усовершенствованное пушечное сверло. Из круглого тела вырезается сектор (не более $1/4$ по длине рабочей части), конец сверла огранен. Верхушка сверла располагается эксцентрично. При резании получается дополнительный направляющий конус OAB внутри тела заготовки. При больших диаметрах сверления на лезвии выполняют стружкоразделительную канавку. Для уменьшения увода сверла резание осуществляется при вращении заготовки. Сверло точно направляют по твердосплавной кондукторной втулке, минимально удаленной от торца обрабатываемой детали.

Эжекторные сверла (рис. 10.23, з) предназначены для высокоскоростного сверления отверстий. Они состоят из неперетачиваемой коронки с напаянными твердосплавными пластинами и двух трубок. Подаваемая под давлением $0,5\text{--}1,5$ МПа с расходом $50\text{--}500$ л/мин в зону резания между стенками трубок СОТС охлаждает режущие кромки и создает разрежение, за счет которого удаляется стружка.

Зенкеры, зенковки и развертки – это многолезвийные размерные осевые режущие инструменты, предназначенные для предварительной или окончательной обработки отверстий, полученных на предшествующих операциях. Общим конструктивным элементом этих режущих инструментов является рабочая часть $З$ (рис. 10.24 а, е) и присоединительная часть, которая выполняется в виде цилиндрического или конического хвостовика (концевой инструмент) либо конического или цилиндрического отверстия с поперечной канавкой на торце (насадной инструмент).

По конструктивному исполнению и инструментальному материалу эти инструменты делятся на:

- цельные из быстрорежущей стали;
- оснащенные напайными пластинами из твердого сплава;
- сборные с механическим креплением быстрорежущих или твердосплавных ножей;

с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин.

С помощью зенкеров (рис. 10.24, а) обрабатывают цилиндрические отверстия, полученные сверлением, литьем, ковкой, штамповкой, с целью придания им более правильной геометрической формы, повышения размерной точности и уменьшения шероховатости поверхности. В зависимости от точности исполнения зенкеры подразделяются на № 1 и 2, предназначенные соответственно для промежуточной обработки перед развертыванием и для окончательной обработки отверстий точностью по 8–10-му квалитетам (табл. 10.4).

Режущая часть (рис. 10.24, а) 1 зенкеров характеризуется углом наклона стружечных канавок или ножей ω , передним и задними углами, главным углом в плане и шириной ленточки f . Обычно зенкеры имеют правый наклон канавок, что обеспечивает хороший отвод стружки и положительный передний угол. Зенкеры для обработки глухих отверстий выполняются с режущей

кромкой, перпендикулярной оси зенкера ($\varphi = 90^\circ$).

Рекомендации по выбору угла наклона стружечных канавок ω в зависимости от обрабатываемого материала приведены в [табл. 10.5](#).

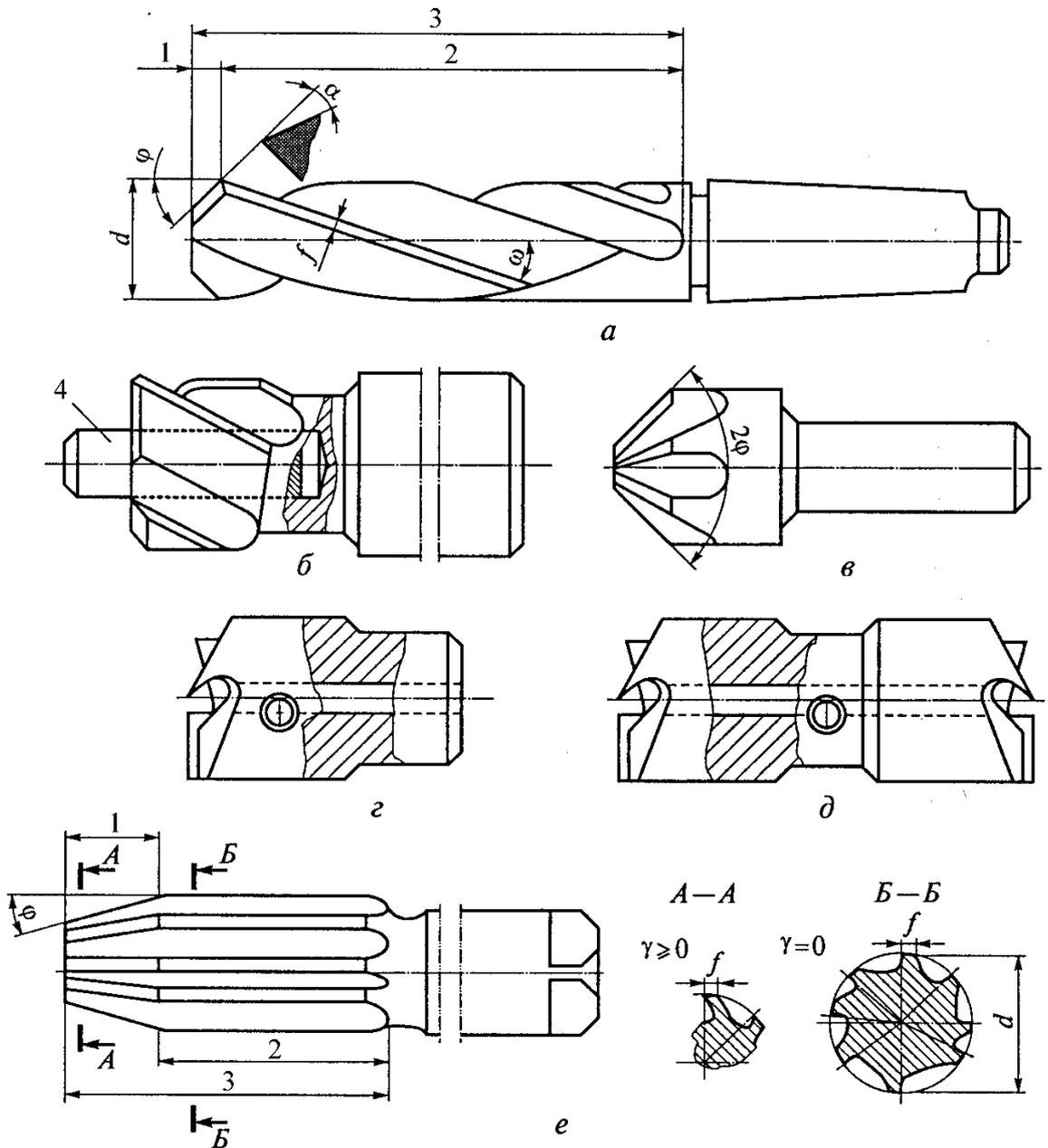


Рис. 10.24. Зенкеры, цековки, зенковки и развертки: *a* – зенкер; *б*, *в* – зенковка; *г* – односторонняя обратная цековка; *д* – двухсторонняя цековка; *е* – развертка; *1* – режущая часть; *2* – калибрующая часть; *3* – рабочая часть; *4* – цапфа; *d* – истинный диаметр развертки; *f* – ширина ленточки; α , γ , φ , ω – углы резания

Таблица 10.4

Предельные отклонения диаметра стандартных зенкеров, мкм

Номинальный диаметр зенкера, мм	Зенкер № 1		Зенкер № 2	
	Верхнее	Нижнее	Верхнее	Нижнее
10–18	–210	–245	+70	+35
18–30	–245	–290	+85	+40
30–50	–290	–340	+100	+50
50–80	–350	–410	+120	+60
80–100	–490	–490	+140	+70

Таблица 10.5

Угол наклона стружечных канавок зенкеров

Тип инструмента	ω ,
Зенкеры из быстрорежущей стали:	
с коническим хвостовиком	20
насадные	15
Зенкеры, оснащенные пластинами из твердого сплава:	
наклон пластины	10
наклон канавок	15
Зенкеры с вставными ножами (наклон ножей)	10

Главный угол в плане влияет на толщину и ширину срезаемого слоя и соответственно на составляющие усилия резания и условия теплоотвода от угловых точек зуба инструмента. У зенкеров, оснащенных твердым сплавом, передний угол получают заточкой передней поверхности параллельно главной режущей кромке. Задняя поверхность зенкеров плоская. При обработке стали и чугуна оптимальное значение угла α составляет 6–10°.

Ленточка на калибрующей части 2 зенкера (см. [рис. 10.24, а](#)) шлифуется по цилиндру. Она служит для направления зенкера и обеспечивает получение требуемого размера отверстия. Ширина ленточки принимается равной 1–2 мм для быстрорежущих зенкеров и 0,5–0,9 мм – для твердосплавных.

Для обработки деталей из нержавеющей и жаропрочных сталей применяют только зенкеры, оснащенные твердым сплавом марок ВК8; ВК60М, ВК100М. Особенностью этих зенкеров является заточка дополнительной переходной режущей кромки под углом ϕ до 15° и отрицательный передний угол от минус 8 до минус 5°. Для обработки легких сплавов применяются специальные зенкеры с увеличенным до 30° углом наклона винтовых канавок, увеличенным до 15° задним углом, увеличенной глубиной канавок и

фасонной задней поверхностью.

Для обработки опорных поверхностей под крепежные винты применяются зенковки со сменной цапфой 4 (см. [рис. 10.24, б](#)). Диаметр цапфы выбирают в зависимости от диаметра основного отверстия. Зенковки с цилиндрическим хвостовиком выпускаются диаметром 15; 18; 20; 22; 24 мм, зенковки с коническим хвостовиком – 15; 18; 20; 22; 24; 26; 30; 32; 33; 34; 36; 40 мм.

Для обработки конических поверхностей под головку винта и обработки центровых отверстий применяют зенковки, показанные на [рис. 10.24, в](#). Они выполняются с углом конуса 60, 90 и 120°, диаметром 8–80 мм. Для подрезки торцев и приливов применяются односторонние обратные (см. [рис. 10.24, з](#)) и двусторонние (см. [рис. 10.24, д](#)) цековки из быстрорежущей стали или оснащенные пластинами из твердого сплава. Они выполняются диаметром 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100 мм и крепятся на специальных оправках с помощью байонетного замка.

Развертка ([рис. 10.24, е](#)) – чистовой осевой инструмент, позволяющий обрабатывать точные цилиндрические и конические отверстия на станках сверлильной, токарной, расточной групп или вручную. Развертка является единственным инструментом для обработки отверстий малого диаметра.

Цилиндрические развертки позволяют обрабатывать отверстия точностью по 6–11-му квалитетам, с шероховатостью Ra 0,8–1,6 мкм. Очень важным параметром разверток является их исполнительный диаметр, задаваемый в виде предельных отклонений от номинального диаметра ([табл. 10.6](#)).

Ручные развертки выпускаются из инструментальной стали 9ХС в двух исполнениях: исполнение 1 – с прямыми канавками диаметром 1–40 мм, исполнение 2 – с винтовыми канавками диаметром 6–40 мм.

Хвостовик у разверток цилиндрический, заканчивающийся квадратом. Особенностью разверток является длинная рабочая часть 3 (см. [рис. 10.24, е](#)), что обеспечивает их хорошее направление и центрирование по обрабатываемому отверстию. Машинные развертки из быстрорежущей стали выпускаются с цилиндрическим хвостовиком (диаметром 2–16 мм) и с коническим хвостовиком (диаметром 5,5–50 мм).

Развертки с вставными ножами из быстрорежущей стали диаметром 32–50 мм выпускаются с цилиндрическим хвостовиком, диаметром 40–100 мм – с коническим. Эти развертки более экономичны, чем цельные, так как их режущая часть выполнена из тонких механически закрепляемых ножей и возможна перестановка ножей в радиальном направлении.

Развертки, оснащенные пластинами из твердого сплава, диаметром 6–12 мм изготавливаются цельными, диаметром 10–82 мм – с коническим хвостовиком, диаметром 32–55 мм – насадными, диаметром 52–300 мм – насадными с привернутыми ножами.

Рабочая часть разверток характеризуется формой, длиной и углами заточки режущей и калибрующей 2 частей. При обработке сквозных или глухих отверстий по 8–9-му квалитетам принимается угол в плане $\varphi = 45^\circ$, для обработки по 7–8-му квалитетам $\varphi < 45^\circ$. Рекомендуемые параметры разверток приведены в [табл. 10.7](#).

Таблица 10.6

Допуски на диаметр разверток

Номинальный диаметр, мм	Отклонение, мкм		Номинальный диаметр, мм	Отклонение, мкм	
	верхнее	нижнее		верхнее	нижнее
1–3	–25	–34	18–30	–60	–74
3–6	–30	–40	30–50	–70	–87
6–10	–40	–50	50–80	–80	–105
10–18	–50	–62	80–100	–90	–120

Таблица 10.7

Параметры машинных разверток

Диаметр, мм	Длина заборной части, мм		Ширина ленточки, мм	Задний угол, град	
	при φ = 5°	при φ = 15°		заборной части	калибрующей части
Быстрорежущие развертки					
3–6	2	1	0,1	10	15
6–9			0,15		
9–28	4,5	2,5	0,2–0,3	8	10
28–50	6,5	3,5	0,3–0,35		
Твердосплавные развертки					
6–12	2,5	4,5	0,15–0,25	15	–
12–16					25
16–32				10	20
32–50	3,5	6,5	0,2–0,4		

Конические развертки предназначены для предварительной и чистовой обработки конических отверстий с конусностью 1:50; 1:30; 1:20; 1:16 и конусами Морзе. Особенность конических разверток – отсутствие калибрующей части. Главными режущими кромками являются образующие конуса по всей длине зубьев. Они затачиваются по передней и задней поверхностям. Вдоль режущих кромок, по конусу, оставлена узкая ленточка шириной не более 0,05 мм, что позволяет точно выдержать конусную поверхность и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Передний и задний углы равны соответственно 5 и 10°.

Развертки для отверстий под конические штифты с конусностью 1 : 50

изготавливаются только чистовыми, остальные – черновыми и чистовыми. На режущих кромках черновых разверток нанесены стружкоразделительные канавки в виде прямоугольной резьбы.

Для удобства измерения реального размера разверток с помощью микрометра все их виды выполняются с четным числом зубьев. Однако при равномерном шаге между зубьями возможна огранка обработанного отверстия, поэтому у разверток зубья выполняются с неравномерным окружным шагом (см. [рис. 10.24, е](#), сечение Б–Б). Только одна пара зубьев лежит в диаметральной плоскости, она и показывает реальный диаметр развертки.

Комбинированные инструменты подразделяются на две группы: для обработки предварительно обработанных отверстий и для обработки отверстий в сплошном материале. Их можно классифицировать:

- по профилю обрабатываемого отверстия (конические, цилиндрические и др.);

- по типу комбинирования (однотипные или разнотипные);

- по способу комбинирования режущих зубьев (с профильными зубьями);

- с зубьями, расположенными на отдельных ступенях (с одновременной работой, с чередующимися и смешанными зубьями);

- по конструктивному признаку (цельные и разъемные);

- по характеру работы ступеней (с последовательной работой, с одновременной работой, с частичным совмещением переходов обработки);

- по способу направления инструмента (по неподвижным кондукторным втулкам, по вращающимся кондукторным втулкам, по ранее обработанному отверстию);

- по виду обработки (черновая, получистовая, чистовая).

В зависимости от назначения и формы отверстий комбинированные инструменты составляют из сверл, зенкеров и разверток, работающих или последовательно, или параллельно. Промышленностью выпускаются: зенкер-развертка с вставными ножами с последовательной работой ступеней; развертка цельная с одновременной работой ступеней с передней и задней направляющими; зенкер двухступенчатый с вставными ножами с одновременной работой ступеней с передней направляющей; развертка ступенчатая с цилиндрическими передней и задней режущими ступенями и конической соединительной режущей ступенью; зенкер трехступенчатый с пластинами из твердого сплава с одновременной работой ступеней; зенкер трехступенчатый перовой цельный с одновременной работой ступеней; зенкер с вставными ножами с чередующимися зубьями с одновременной работой ступеней; сверло-развертка с задней направляющей частью (по кондукторной втулке); сверло-зенкер двухступенчатый составной (разъемная часть – сверло, неразъемная – зенкер) с последовательной работой ступеней; сверло-зенкер двухступенчатый цельный с последовательной работой ступеней.

10.4.2. Особенности процесса сверления

Процесс сверления протекает в более тяжелых условиях, чем точение. В процессе резания затруднены отвод стружки и подача охлаждающей жидкости в зону резания. Стружка дополнительно трется о поверхность канавок сверла, а ленточки сверла – об обработанную поверхность. Выделяемое при резании количество теплоты в основном поглощается режущим инструментом и заготовкой. Особенно это заметно при сверлении отверстий в материалах с низким коэффициентом теплопередачи (например, пластмассы, бетон). При обработке этих материалов до 95 % выделяемой теплоты поглощается сверлом, поэтому, если не использовать охлаждение, происходит оплавление режущих кромок сверла.

Скорость резания по сечению сверла не постоянна: она уменьшается от периферии сверла к его центру. Следовательно, по сравнению с точением при сверлении увеличены деформации срезаемого слоя и стружки, а также трение (пары «сверло – заготовка», «стружка – сверло», «стружка – заготовка»). В связи с этим необходимо снижать скорость резания на 30–60 %.

10.4.3. Режимы резания при сверлении

За скорость резания V , м/мин, при сверлении принимают окружную скорость наиболее удаленной точки режущего лезвия. При назначении скорости движения подачи различают подачу минутную S_m , подачу на оборот S_o и подачу на зуб S_z :

$$V = \pi Dn / 1000; S_m = nS_o = nS_z t,$$

где D – наружный диаметр сверла (диаметр обрабатываемого отверстия), мм; n – частота вращения шпинделя станка, об/мин; z – число зубьев; d – диаметр отверстия в заготовке, мм.

За глубину резания t при сверлении, мм, принимают половину диаметра сверла (при сверлении отверстия в сплошном материале), а при рассверливании, зенкерованием и развертывании глубина резания t_p составляет или половину разницы между диаметром обработанного отверстия и заготовки:

$$t_c = 0,5D; t_p = 0,5(D - d).$$

10.4.4. Станки сверлильной группы

Вертикально-сверлильные станки. В единичном и мелкосерийном производстве применяются вертикально-сверлильные станки (рис. 10.25, а). На фундаментной плите 9 смонтирована колонна 8, по вертикальным направляющим которой перемещаются стол 2 и сверлильная головка 4. Установочные перемещения стола осуществляются вручную с помощью винтового домкрата 1. На верхней плоскости стола 2 устанавливаются рабочие

приспособления или заготовка. Установочные вертикальные перемещения сверлильной головки осуществляются вручную за счет системы противовесов 7, прикрепленных к сверлильной головке 4 тросом, перекинутым через блок 6. Вращательное движение инструменту передается от электродвигателя 5 через коробку скоростей и шпиндель 3. Механизмы главного движения и движения подачи размещены внутри сверлильной головки.

Вертикально-сверлильные станки с ЧПУ. В единичном и серийном производстве широко применяют вертикально-сверлильные станки с ЧПУ. Их особенностью является сочетание легкой переналадки станка на обработку различных изделий с автоматическим или полуавтоматическим циклом работы. Вертикально-сверлильный станок с ЧПУ показан на [рис. 10.25, б](#). По вертикальным направляющим станины 8 движутся салазки 15, по горизонтальным направляющим которых перемещается стол 2. Движения стола и салазок осуществляются по числовой программе, что обеспечивает точное перемещение заготовки относительно режущего инструмента. По направляющим вертикальной части станины (стойки) перемещается сверлильная головка 4 со шпинделями 3. Внутри сверлильной головки размещены механизмы главного движения и движения подачи. Все перемещения (движения) режущих инструментов также осуществляются по программе.

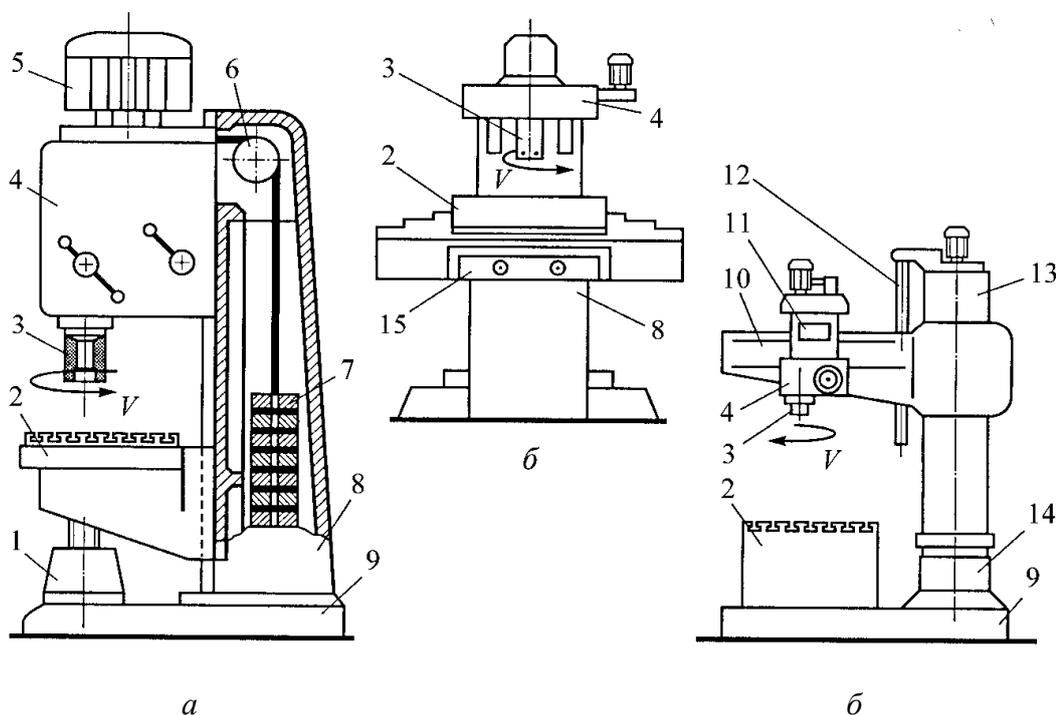


Рис. 10.25. Станки сверлильной группы: а – вертикально-сверлильный станок; б – вертикально-сверлильный станок с ЧПУ; в – радиально-сверлильный станок; 1 – домкрат; 2 – стол; 3 – шпиндель; 4 – сверлильная головка; 5 – электродвигатель; 6 – блок; 7 – противовес; 8 – вертикальная станина (колонна); 9 – фундаментная плита; 10 – траверса; 11 – коробка скоростей; 12 – винтовой механизм; 13 – гильза; 14 – тумба; 15 – салазки; V – движение резания

Радиально-сверлильные станки. При последовательной обработке нескольких отверстий в массивных или крупногабаритных заготовках применение вертикально-сверлильных станков крайне неудобно, так как практически невозможно точно совместить ось вращения режущего инструмента с осью обрабатываемого отверстия. Поэтому при обработке таких заготовок применяются радиально-сверлильные станки (рис. 10.25, в), при работе на которых заготовка остается неподвижной, а шпиндель с инструментом перемещается относительно заготовки и может устанавливаться в требуемой точке горизонтальной плоскости. На фундаментной плите 9 закреплена тумба 14 с вертикальной колонной. На колонне установлена гильза 13, поворачивающаяся относительно колонны в горизонтальной плоскости на 360°. Траверса 10, закрепленная на гильзе, может вертикально перемещаться относительно колонны благодаря винтовому механизму 12. На траверсе имеются горизонтальные направляющие, по которым перемещается сверлильная головка 4. Механизм сверлильной головки состоит из шпинделя 3, коробки скоростей 11 и коробки подачи. Заготовка устанавливается неподвижно на стол 2. Угловые перемещения траверсы 10 и радиальные перемещения сверлильной головки в горизонтальной плоскости позволяют точно установить режущий инструмент относительно оси обрабатываемого отверстия.

10.4.5. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на сверлильных станках

Поверхность, на которой нужно просверлить отверстие, должна быть перпендикулярна оси отверстия. В противном случае возможна поломка сверла. В связи с этим у литых деталей предусматриваются специальные плоскости (платики), перпендикулярные оси отверстия. У заготовок, полученных методами обработки давлением, фрезеруют аналогичные уступы. При конструктивной невозможности выполнения этого условия требуется применение специальных направляющих кондукторных втулок. Высокоточные отверстия целесообразно выполнять сквозными, а не глухими. Если требуется глухое точное отверстие, лучше сверлить сквозное и заглушить его пробкой. Глубокие сквозные отверстия желательно заменить на два неглубоких, расположенных оппозитно, что позволит сверлить их одновременно с двух сторон. Гладкие глубокие отверстия лучше заменять на ступенчатые с постепенным уменьшением диаметра. Желательно не использовать отверстия с пересекающимися осями или с совпадением части их образующей, так как возможна поломка сверл. На заготовках, имеющих форму тел вращения, целесообразно предусматривать токарную обработку торцов вместо цекования каждой торцевой поверхности бобышек.

10.5. Обработка заготовок на расточных станках

Растачивание – лезвийная обработка резанием отверстий. Расточные станки применяются в основном для обработки отверстий с точно

координированными осями. На расточных станках выполняется сверление, зенкерование, развертывание, растачивание отверстий резцом, обтачивание наружных цилиндрических поверхностей и подрезка торцов резцом, нарезание резьбы и фрезерование плоскостей.

10.5.1. Особенности обработки заготовок на расточных станках

При растачивании формирование поверхностей происходит за счет сочетаний вращательного движения инструмента (главного движения) и движения подачи, сообщаемого инструменту или заготовке. Направление движения подачи может быть вертикальным, продольным или поперечным.

Наиболее распространенным видом работ на расточных станках является обработка внутренних поверхностей расточными резцами (рис. 10.26, а). Расточные резцы работают в худших условиях, чем токарные. Они имеют меньшие размеры, зависящие от размера оправок и обрабатываемого отверстия, низкую жесткость системы «резец – оправка». При этом процесс резания затруднен, вследствие неблагоприятных условий для схода стружки и подачи СОТС.

Скорость резания, м/мин, при работе на расточных станках – окружная скорость наиболее удаленной точки главной режущей кромки режущего инструмента:

$$V = \pi Dn / 1000,$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности при резании резцом, мм;
 n – число оборотов шпинделя станка, об/мин.

Глубина резания t , мм, равна разнице радиусов обработанного и обрабатываемого отверстий.

На расточных станках обрабатывают цилиндрические или конические отверстия, наружные цилиндрические или плоские поверхности, уступы, канавки, нарезают резьбу резцами.

Растачивание цилиндрических отверстий производят с целью увеличения диаметра и улучшения точностных параметров обработанного отверстия. При соотношении длины отверстия к его диаметру менее пяти применяют консольное закрепление резца или резцовой оправки (рис. 10.26, а). При соотношении больше пяти жесткость консольных оправок недостаточна, поэтому применяют двухопорные оправки (борштанги). Аналогичную схему обработки применяют при черновом растачивании двух и более отверстий, имеющих общую ось (рис. 10.26, б). При этом повышается производительность обработки, но точность отверстий невелика, поэтому чистовую обработку отверстий желательно проводить отдельно. Отверстия большого диаметра, но малой длины растачивают резцом, закрепленным на планшайбе (рис. 10.26, в). Отверстия диаметром более 130 мм целесообразно растачивать резцовыми блоками или головками.

Отверстия с параллельными осями растачивают с одного установка:

вначале растачивают одно отверстие, затем перемещают стол расточного станка на расстояние, равное межцентровому расстоянию между осями отверстий, и растачивают следующее отверстие.

Отверстия с взаимноперпендикулярными осями также растачивают с одного установка: после расточки одного отверстия стол станка поворачивают на 90° и растачивают второе отверстие.

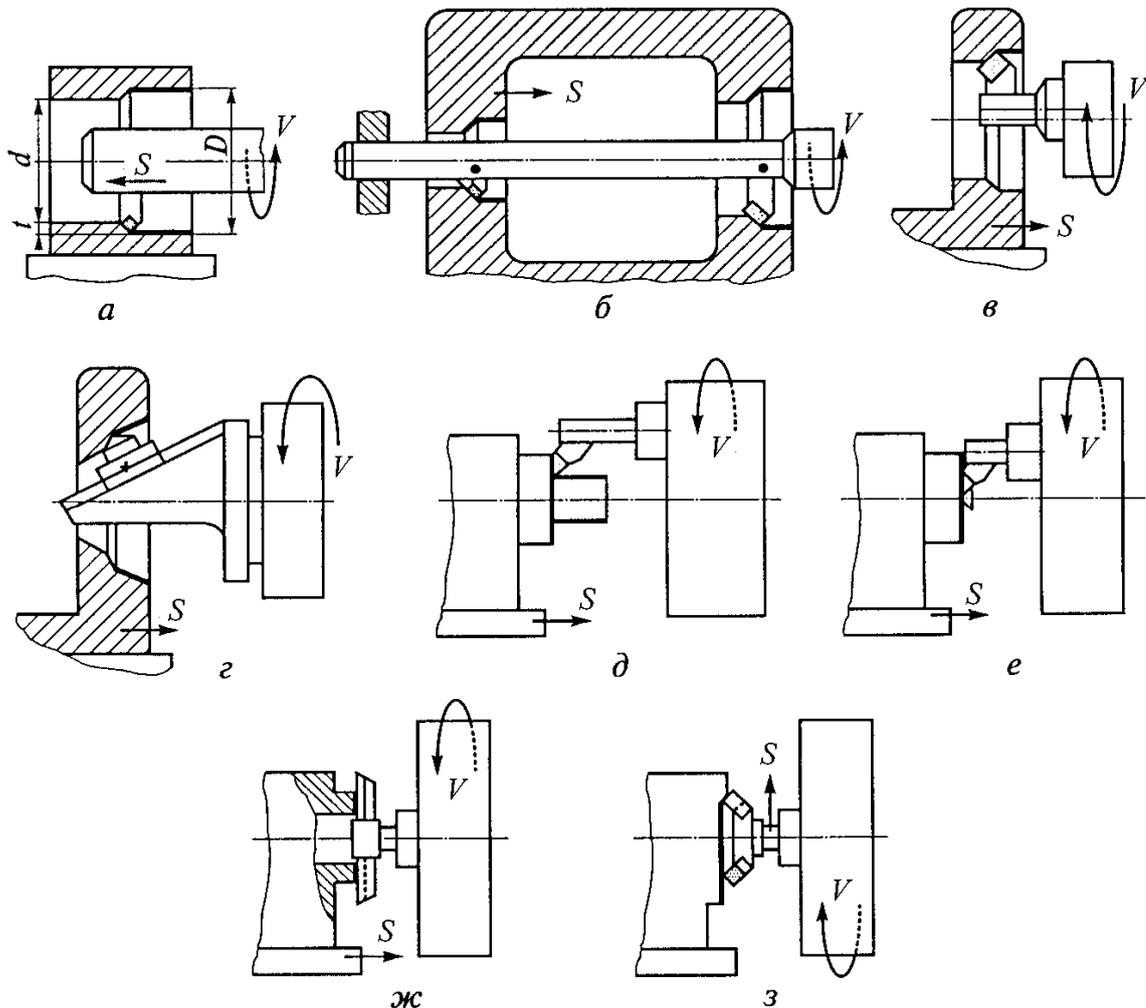


Рис. 10.26. Схемы обработки поверхностей на расточных станках: *а* – растачивание консольным закреплением резца; *б* – растачивание борштангой; *в, г* – растачивание резцом, закрепленным в планшайбе; *д* – обтачивание; *е, ж* – подрезание торцов; *з* – обработка плоскостей; *d, D* – диаметры заготовки и изделия; *t* – глубина резания

Конические отверстия обрабатывают расточными головками, закрепленными в расточном шпинделе. Отверстия диаметром более 80 мм растачивают, закрепив резец в специальном приспособлении, которое снабжено направляющими для перемещения резца под углом к оси вращения расточного шпинделя (рис. 10.26, *г*). Отверстия большой длины и диаметра растачивают, закрепив аналогичное приспособление на двухопорной оправке. Сверление, зенкерование, развертывание, цекование, нарезание резьбы метчиком ведут, закрепив соответствующий инструмент в расточном шпинделе.

Инструменту придают оба движения (главное и подачи).

Обтачивание наружных цилиндрических поверхностей производят резцом, закрепленным в специальной планшайбе (рис. 10.26, д). Резцу сообщают главное движение, заготовке – движение подачи.

Подрезание торцов можно провести двумя способами: проходными резцами (рис. 10.26, е), сообщая последнему радиальную подачу, или на осевой подаче пластинчатым резцом (рис. 10.26, ж).

Развитые вертикальные плоскости можно обработать фрезой (рис. 10.26, з) на продольной подаче.

10.5.2. Режущий инструмент

Расточные резцы, используемые на универсальных токарно-винторезных станках (рис. 10.27, а), имеют призматическое тело с утоньшением на конус и отогнутую головку, которая может выполняться целиком из быстрорежущей стали или с напаянной твердосплавной пластиной.

Для расточных станков применяются специальные расточные резцы прямоугольного (рис. 10.27, б) или круглого (рис. 10.27, в) сечения стержня. Для расточки отверстий диаметром 3–12 мм применяют цельные твердосплавные расточные резцы (рис. 10.27, г), выполненные из стального корпуса 2 и твердосплавной рабочей части 1, которая впаяна в отверстие корпуса.

Резцы выпускаются трех типов:

тип 1 – для координатно-расточных станков;

тип 2 – для токарных автоматов;

тип 3 – для токарных станков.

Резцы первых двух типов имеют цилиндрический хвостовик. Резцы третьего типа имеют квадратный хвостовик сечением 12×12 мм.

В общем случае расточные резцы выпускаются с режущей кромкой, расположенной выше оси корпуса (рис. 10.27, д), или с режущей кромкой, отогнутой вниз (рис. 10.27, е), – *виброустойчивые резцы*. При деформации тонкой цилиндрической рабочей части резца она отгибается вниз. При расположении вершины резца выше оси корпуса она врежется в обрабатываемую поверхность (+ δ), при расположении ниже оси корпуса – отжимается от обрабатываемой поверхности (– δ). В первом случае вибрации резца будут увеличиваться, во втором – уменьшаться. Виброустойчивый резец может иметь большее сечение, чем обычный, за счет более благоприятного его расположения в растачиваемом отверстии. При этом жесткость резца шестикратно увеличивается.

Для растачивания отверстий диаметром свыше 20 мм применяют *пластинчатые резцы* (рис. 10.27, ж). Различают однолезвийные и двухлезвийные пластинчатые резцы. Однолезвийные резцы более универсальны: ими можно растачивать отверстия различных диаметров. Двухлезвийные – специальные резцы, их изготавливают по размеру растачиваемого отверстия.

При обработке отверстий диаметром более 40 мм применяются *сборные расточные блоки* (рис. 10.27, з). В пазах корпуса 2 устанавливается

расточный резец *1*, который регулируется на требуемый размер винтом *4* и закрепляется винтом *3*.

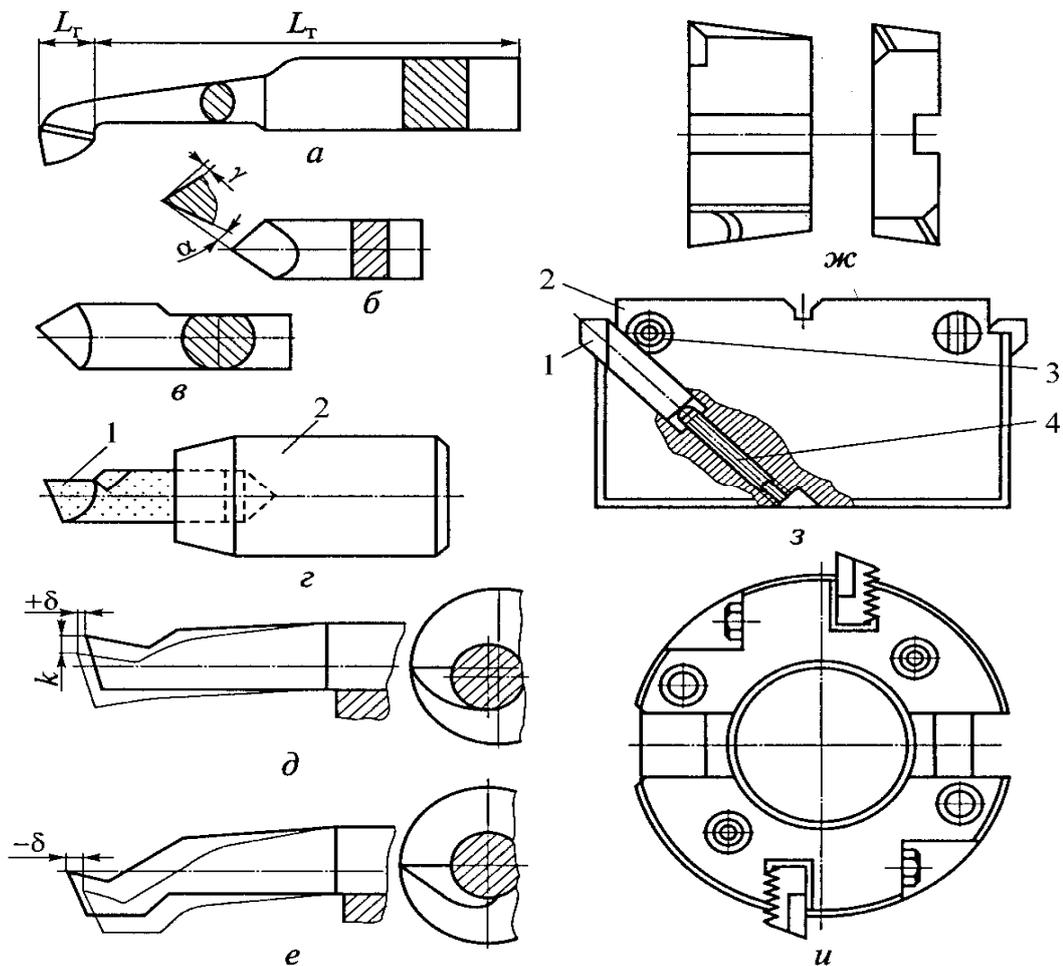


Рис. 10.27. Расточные инструменты: *а* – резец для универсального токарно-винто-резного станка; *б, в* – резцы для специальных расточных станков; *г* – цельный твердосплавный резец: *1* – тело резца; *2* – головка резца; *д* – изгиб обычного резца; *е* – изгиб виброустойчивого резца; *ж* – пластинчатый резец; *з* – расточный блок: *1* – рабочая часть; *2* – корпус; *3, 4* – винты; *и* – расточная головка; *k* – изгиб резца; δ – врезание резца в обработанную поверхность; L_T – длина головки резца; L_T – длина тела резца

Обработку отверстий диаметром 130–225 мм ведут *расточными головками* (рис. 10.27, *и*). Подрезные резцы головки предварительно устанавливаются по диаметру и торцу, что позволяет обрабатывать как образующую, так и торец отверстия.

10.5.3. Технологическая оснастка, применяемая при растачивании

Заготовки на столе расточного станка устанавливают с помощью различных универсальных приспособлений: прижимных планок, станочных болтов со срезанной головкой, угольников, призм. Для повышения точности обработки отверстий расточный инструмент направляют по оси обрабатываемого отверстия с помощью направляющих (кондукторных

втулок). При обработке отверстий, ось которых не перпендикулярна наружной поверхности, применение кондукторных втулок обязательно. Режущий инструмент устанавливают в консольных (рис. 10.28, *а*) или двухопорных (рис. 10.28, *б*) оправках, патронах и т. п.

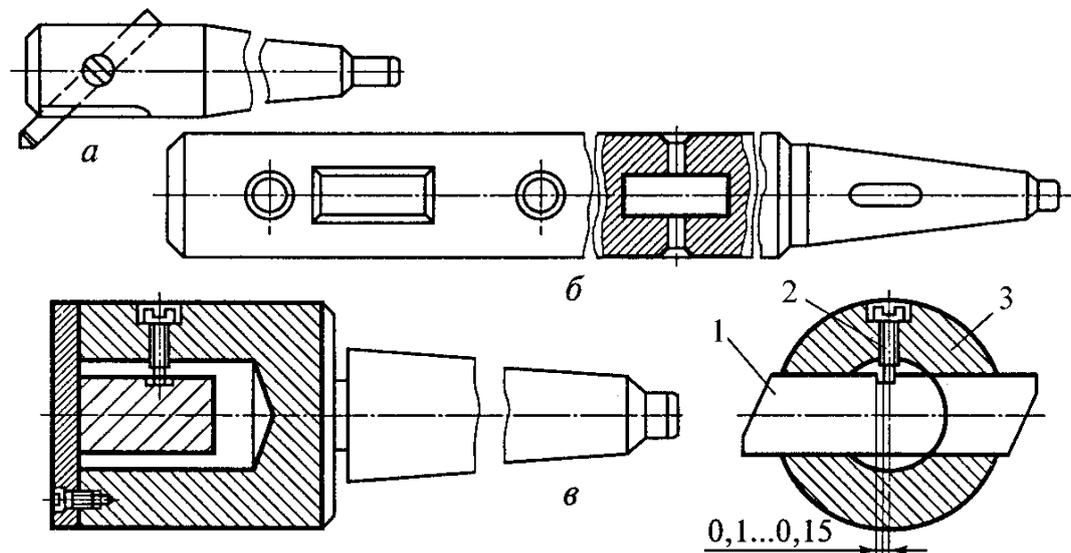


Рис. 10.28. Технологическая оснастка, применяемая при растачивании:
а – консольная оправка; *б* – двухопорная оправка; *в* – специальная оправка:
 1 – пластина; 2 – винт; 3 – корпус

Использование оправок вызвано тем, что шпиндели расточных станков не приспособлены для непосредственного закрепления режущего инструмента. В консольных оправках закрепляют один или два расточных резца для обработки коротких или глухих отверстий. При обработке длинных, сквозных отверстий используются двухопорные оправки. Для растачивания отверстий, расположенных на большом удалении от торца планшайбы расточного станка, или для растачивания нескольких соосно расположенных отверстий используют удлиненные двухопорные оправки. Пластинчатые развертки устанавливают в специальных оправках (рис. 10.28, *в*). Пластины 1 устанавливают в гнездо корпуса 3 оправки и зажимают винтом 2. Наличие зазора между пазом пластины и винтом позволяет развертке самоустанавливаться по обработанной поверхности.

10.5.4. Расточные станки

Горизонтально-расточные станки (рис. 10.29, *а*) обеспечивают точность координат осей обрабатываемых отверстий до 0,03 мм. На станине 12 смонтирована передняя стойка 9, по вертикальным направляющим которой с помощью винтового механизма 8 перемещается шпиндельная бабка 7. В шпиндельной бабке размещены механизмы главного движения и движения подачи. Шпиндель 14 коробки скоростей полый, на нем закреплена планшайба 6 с радиальным суппортом 13. Внутри полого шпинделя размещен

расточный шпиндель 5. Задняя стойка 1 с подшипником 2 и посадочным окном 3 предназначена для поддержки длинных расточных оправок. Подшипник 2 перемещается синхронно с шпиндельной бабкой 7, что обеспечивает соосность посадочного окна 3 и расточного шпинделя 5.

Заготовка устанавливается на поворотном столе 4, состоящем из поперечной каретки 10 и продольных салазок 11. Передняя 9 и задняя 1 стойки и продольные салазки 11 могут перемещаться по горизонтальным направляющим станины. Главное движение сообщается режущему инструменту, установленному в расточном шпинделе 5 или планшайбе 6. Движение подачи в зависимости от вида обработки и характера обрабатываемой поверхности придается столу (за счет перемещения каретки 10 или салазок 11) или инструменту (за счет радиального перемещения суппорта 13 или вертикального перемещения шпиндельной бабки 7). На базе горизонтально-расточного станка выполнены конструкции других универсальных и специальных расточных станков.

Координатно-расточные станки применяют для обработки точных отверстий с точностью координат осей 3–5 мкм. Одностоечный координатно-расточный станок (рис. 10.29, б) состоит из станины 12, стойки 9 и стола 17. В верхней части стойки размещена коробка скоростей 16. По вертикальным направляющим стойки 9 перемещается расточная головка 15 с размещенными внутри коробкой подач и шпинделем 14. Заготовку устанавливают на столе 17, состоящем из двух частей: продольной каретки и поперечных салазок 18. Координаты осей растачиваемых отверстий устанавливаются перемещением стола в двух взаимно-перпендикулярных направлениях: продольном и поперечном. Для точного отсчета используется оптическая система.

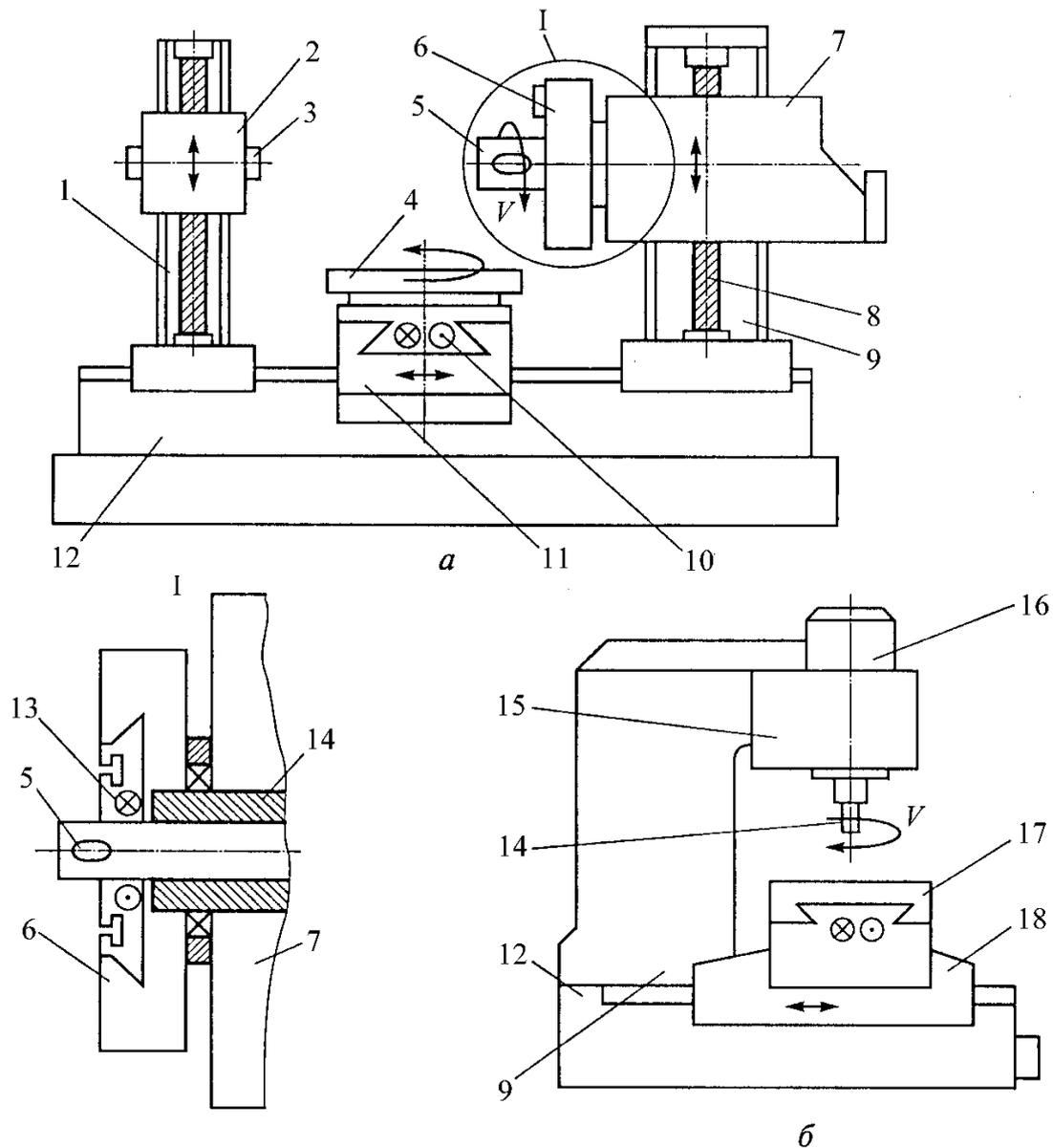


Рис. 10.29. Расточные станки: *а* – горизонтально-расточный станок; *б* – координатно-расточный станок; 1 – задняя стойка; 2 – подшипник; 3 – посадочное окно; 4 – поворотный стол; 5 – расточный шпиндель; 6 – планшайба; 7 – шпиндельная бабка; 8 – винтовой механизм; 9 – передняя стойка; 10 – поперечная каретка; 11 – продольные салазки; 12 – станина; 13 – радиальный суппорт; 14 – шпиндель; 15 – расточная головка; 16 – коробка скоростей; 17 – стол; 18 – поперечные салазки; *V* – движение резания

На *алмазно-расточных станках* проводят окончательную обработку отверстий твердосплавным или алмазным инструментом. По числу расточных головок различают станки одностороннего и двустороннего действия. На станках двустороннего действия обрабатывают отверстия с параллельными осями с точностью координат осей 1–5 мкм. Высокая точность обработанных отверстий обусловлена применением высоких скоростей резания (200–1000 м/мин), маленьких подач (0,01–0,1 мм/об) и глубин резания (0,05–0,2 мм).

10.5.5. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на расточных станках

Растачиваемое отверстие должно быть простой формы. Глубокие отверстия необходимо предусматривать сквозными. Глухие глубокие и конические отверстия или отверстия с выточкой обрабатывать сложно. Соосные отверстия лучше располагать так, чтобы их диаметры последовательно уменьшались. При этом отверстия можно обрабатывать одновременно, за один проход, располагая расточные резцы на единой борштанге. Если это условие не соблюдается, расточку придется вести разными борштангами в два и более приемов. Если отверстие в центральной стенке имеет диаметр меньший, чем отверстия в наружных стенках, такая конструкция является нетехнологичной. Расположение торцов в разных плоскостях (рис. 10.30, *а*, плоскости 1–1, 2–2) затруднит обработку.

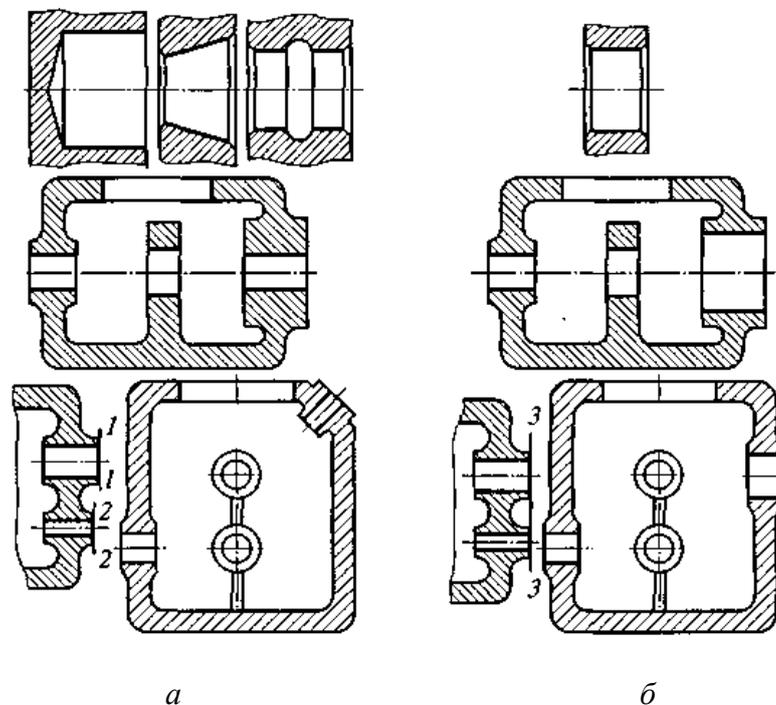


Рис. 10.30. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на расточных станках: *а* – нетехнологичные конструкции; *б* – технологичные конструкции; 1–1, 2–2, 3–3 – плоскости подрезаемых торцов

Наружные торцы отверстий лучше располагать в одной плоскости (рис. 10.30, *б*, плоскость 3–3), что позволит обработать их одним инструментом с одного установка. В корпусных деталях диаметры отверстий в наружных стенках необходимо выбирать таким образом, чтобы был свободный доступ к внутренним поверхностям для обработки и измерений. Обрабатываемые отверстия лучше располагать на параллельных или взаимно-перпендикулярных осях. Применение наклонных осей обрабатываемых поверхностей затрудняет обработку из-за сложности установки заготовки на столе станка.

10.6. Обработка заготовок на протяжных станках

Протягивание – лезвийная обработка резанием открытых поверхностей; главное движение, прямолинейное возвратно-поступательное, придается режущему инструменту (протяжке или прошивке), движение подачи заложено в конструкции режущего инструмента в виде подъема на зуб.

Подъем на зуб – превышение по высоте или ширине размера режущей части зуба по отношению к предыдущему зубу.

По характеру движения режущего инструмента различают протяжки (инструмент вытягивается из отверстия) и прошивки (инструмент проталкивается в отверстие).

Протягивание – высокопроизводительный процесс обработки наружных и внутренних поверхностей, обеспечивающий высокую точность формы и размеров обработанной поверхности. При протягивании профиль обработанной поверхности копируется профилем режущих зубьев, поэтому протяжки – узкоспециальный инструмент, применяемый для обработки поверхностей со строго заданными формой и размерами.

По характеру обработанной поверхности различают внутренние и наружные протяжки.

Внутренние протяжки предназначены для обработки круглых, квадратных, многогранных и шлицевых отверстий, а также шпоночных и других фигурных пазов. Промышленностью выпускаются стандартные внутренние протяжки:

круглые переменного резания диаметром 10–90 мм; обрабатываются отверстия по 7–9-му квалитетам, Ra 0,63–2,5 мкм;

для протяжки квадратных отверстий со стороной квадрата 10–60 мм; обрабатываются отверстия по 11–12-му квалитетам, Ra < 20 мкм;

шлицевые – для обработки отверстий с прямобочным профилем, с центрированием по наружному диаметру 20–88 мм, комбинированные, переменного резания; для обработки шлицов с числом шлицов 6, 8, 10;

для шлицевых отверстий с эвольвентным профилем, с центрированием по наружному диаметру 12–90 мм, модулем 1–5 мм.

Наружные протяжки предназначены для обработки наружных поверхностей, пазов, уступов, являются специальным видом инструмента, поэтому не стандартизованы. При наружном протягивании, которое применяется вместо строгания, фрезерования, шлифования, за одну операцию обрабатывают как можно больше сопряженных поверхностей, для этого протяжки соединяют в блоки.

10.6.1. Элементы и геометрия режущей части протяжек

Круглая протяжка (рис. 10.31) состоит из следующих элементов. Замковая часть 1 (хвостовик) служит для закрепления протяжки в патроне тягового устройства станка; шейка 2 – соединительная поверхность. Направ-

ляющий конус 3 и передняя направляющая часть 4 служат для центрирования заготовки в начале резания. Режущая часть 5 состоит из режущих зубьев, высота или ширина которых увеличиваются на высоту срезаемого слоя, и служит для срезания основной доли припуска. Для облегчения образования стружки на режущих зубьях в шахматном порядке выполняются стружколомные канавки. Калибрующая часть 6 предназначена для придания обработанной поверхности окончательной формы, необходимой точности и шероховатости. Она состоит из калибрующих зубьев, форма и размеры которых соответствуют форме и размерам обработанной поверхности. Задняя направляющая часть 7 необходима для поддержания протяжки при выходе ее из обработанного отверстия.

Круговая протяжка (рис. 10.32) – сложный специальный инструмент, предназначенный для наружного протягивания фасонных поверхностей (обычно для нарезания зубчатых венцов). На образующей вращающегося корпуса 9 болтами 10 закреплены блоки 8 с черновыми режущими зубьями. По направляющим паза корпуса перемещается подвижный элемент 5, на образующей которого размещены блоки 6 с чистовыми (профилирующими) зубьями. Между последним чистовым и первым черновым зубьями находится свободный сектор 7, необходимый для подвода (отвода) протяжки в зону резания (и из нее) и для делительного поворота заготовки при нарезании зубчатого венца. Корпус 9 протяжки крепится к инструментальному шпинделю станка 1 болтами 12.

Прямолинейное перемещение чистовых зубьев относительно заготовки обеспечивается суммированием вращательного движения корпуса протяжки и возвратно-поступательного перемещения подвижного элемента. Последнее достигается взаимодействием следящих роликов 3 с копиром 13, установленным на станине 2 станка. Следящие ролики, прижимаемые к копиру пружиной 11, установлены под каждым чистовым зубом.

Прошивка 3 (рис. 10.33) проталкивается в отверстие заготовки 4 штоком поршня 2 пресса. Заготовка устанавливается на столе 1 пресса. Поскольку прошивка работает на сжатие, ее длина ограничена (не более 15 диаметров), поэтому прошивки обычно применяются для полустойкой правки цилиндрических отверстий.

Черновые и чистовые зубья протяжек имеют различную геометрию. Черновые зубья (см. рис. 10.31, сечение А–А) выполняются острозаточенными. Задний угол для внутренних протяжек равен 3° , для наружных – $3\text{--}8^\circ$. Передний угол выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала в пределах $10\text{--}20^\circ$. Шаг между зубьями выбирается из требования одновременности работы не менее трех зубьев. Подъем на зуб – $0,06\text{--}0,3$ мм/зуб.

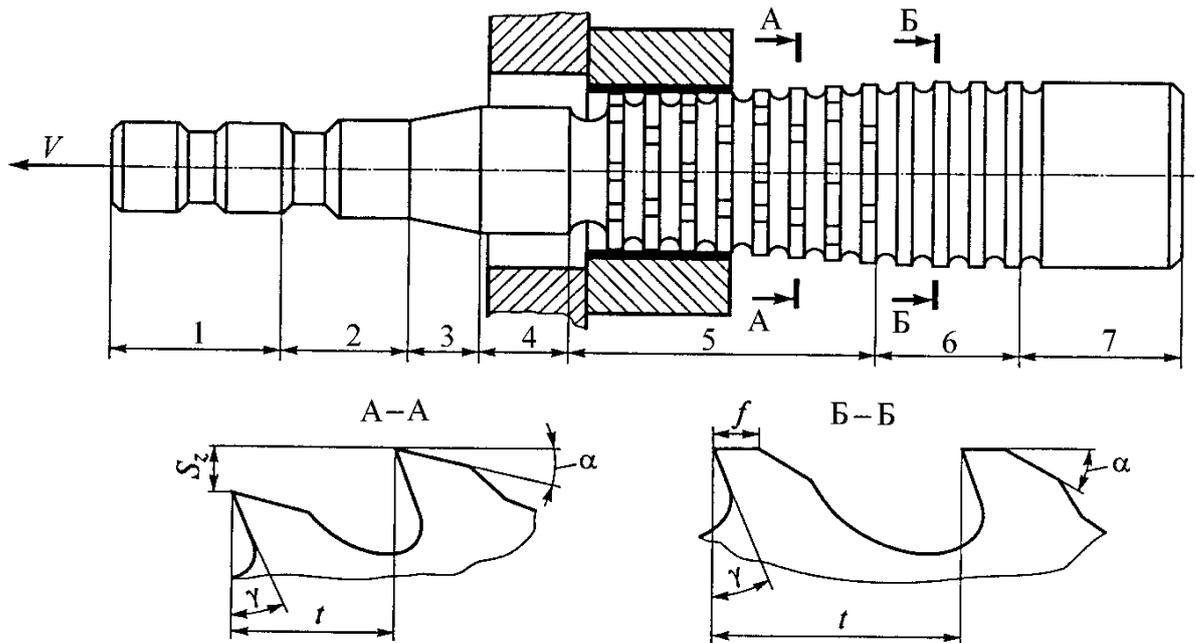


Рис. 10.31. Круглая протяжка: 1 – замковая часть; 2 – шейка; 3 – направляющий конус; 4, 7 – передняя и задняя направляющие части соответственно; 5 – режущая часть (режущие зубья); 6 – калибрующая часть (калибрующие или чистовые зубья); V – движение резания; f – ленточка; S_z – подъем на зуб; t – шаг между зубьями; α , γ – главные задний и передний углы соответственно

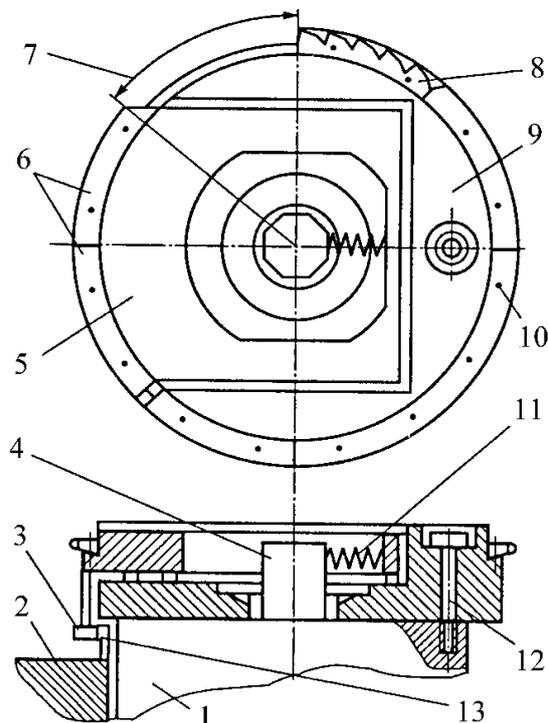


Рис. 10.32. Круговая протяжка: 1 – инструментальный шпиндель; 2 – станина; 3 – следящие ролики; 4 – упор; 5 – подвижный элемент; 6, 8 – резцовые блоки; 7 – свободный сектор; 9 – корпус; 10, 12 – болты; 11 – пружина; 13 – копир

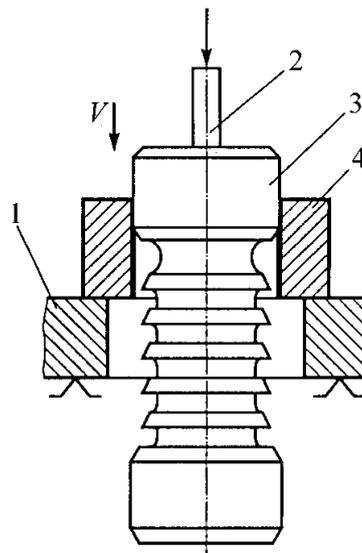


Рис. 10.33. Прошивание: 1 – стол; 2 – шток поршня; 3 – прошивка; 4 – заготовка; V – движение резания

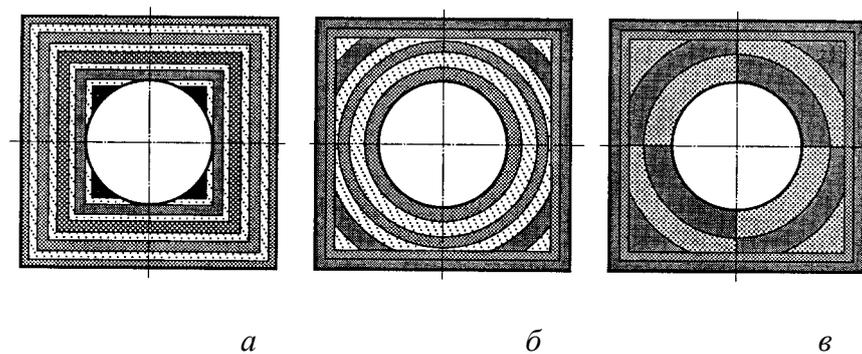


Рис. 10.34. Схемы срезания припуска: а – профильная; б – генераторная; в – групповая

Чистовые зубья (см. [рис. 10.31](#), сечение Б–Б) выполняются с ленточкой, равной 0,02–0,3 мм. Передний угол выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала в пределах 0–15°. Нулевой передний угол обычно назначается для профильных протяжек, что позволяет не потерять геометрическую точность зубьев при переточках. Шаг между зубьями t выбирается из требования участия в работе только одного зуба. Подъем на зуб – 0,015–0,03 мм/зуб.

При протягивании фасонных внутренних поверхностей в заготовке сверлится цилиндрическое отверстие. Затем производится протягивание до получения необходимого профиля. При протягивании применяются несколько схем срезания припуска, а следовательно, и профилирования зубьев протяжки.

При профильной схеме ([рис. 10.34, а](#)) черновые и чистовые зубья профилируются по кривой, эквидистантной (равноудаленной) обработанной поверхности. Такая схема обеспечивает высокую геометрическую точность обработанной поверхности, очень простое профилирование и переточку зубьев. Но от зуба к зубу возрастает длина режущей кромки, что приводит к

необходимости уменьшать подъем на зуб. Протяжки получают настолько длинными, что приходится разбивать обработку на несколько этапов.

При генераторной схеме (рис. 10.34, б) черновые зубья профилируются дугами окружности или сочетанием дуга окружности – кривая, эквидистантная профилю, т. е. обрабатываемый профиль генерируется зубом протяжки. От зуба к зубу длина режущей кромки возрастает меньше, чем при профильной схеме. Следовательно, можно назначать большие подачи на зуб и уменьшать длину протяжки.

При групповой схеме (рис. 10.34, в) черновой припуск разбивается на секторы, каждый из которых обрабатывает своя группа черновых зубьев, спрофилированных по генераторной схеме. От зуба к зубу длина режущей кромки возрастает меньше, чем при генераторной схеме, т. е. можно назначать еще бóльшие подачи на зуб и уменьшать длину протяжки. При использовании генераторной или групповой схем резко усложняется заточка и профилирование зубьев, поэтому на чистовых зубьях протяжек всегда используется профильная схема.

10.6.2. Особенности процесса протягивания

Каждый зуб протяжки работает как строгальный резец. Малая высота зубьев и высокая жесткость протяжки в диаметральной плоскости позволяют назначать достаточно высокие режимы резания. За один рабочий ход генерируется весь профиль обработанной поверхности, поэтому протягивание является высокопроизводительным процессом, однако имеет особенности, которые необходимо учитывать при выборе протяжки и схемы обработки.

При резании стружка, снимаемая каждым зубом, должна разместиться во впадине между зубьями. Если объем срезаемой стружки с учетом ее усадки будет больше объема впадины между зубьями, протяжку заклинит и произойдет поломка инструмента.

Протягивание с прямолинейным движением резания – процесс прерывистый. Необходимо возвратно-поступательное движение исполнительного механизма главного движения. Прямой ход – рабочее движение, обратный – холостой ход. Инерция масс исполнительного механизма главного движения не позволяет работать на высоких скоростях резания, обычно принимают 8–15 м/мин.

Обработка заготовок на протяжных станках. Протяжками или прошивками обрабатывают цилиндрические отверстия после сверления, растачивания, зенкерования, а также отверстия, полученные на стадии заготовительных операций. При обработке заготовки цилиндрической протяжкой 2 (рис. 10.35, а) заготовку 3 устанавливают на сферическую опору 1 или на плоскую опору.

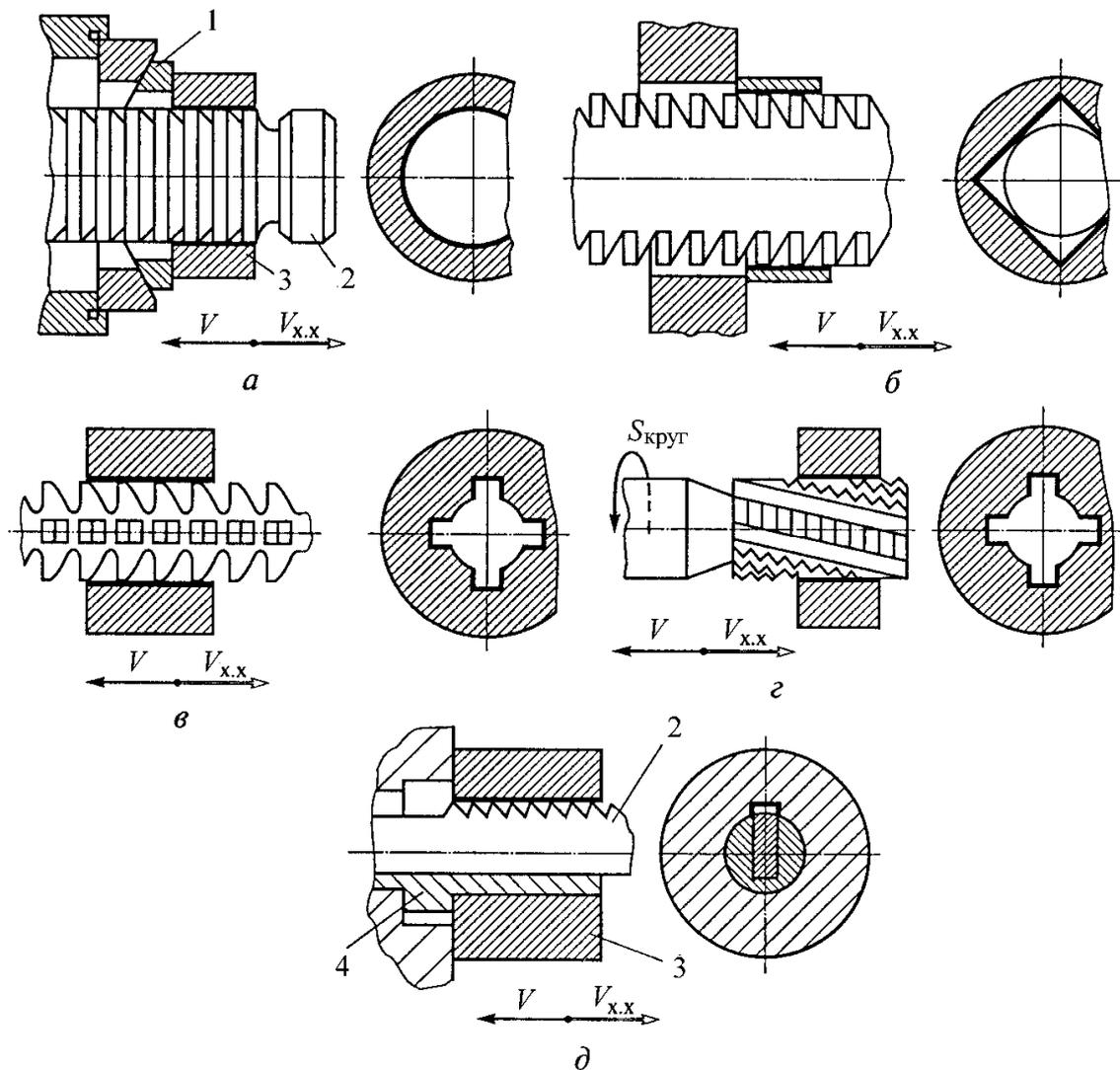


Рис. 10.35. Схемы протягивания отверстий: *а* – на сферической опоре; *б* – многогранных; *в* – прямых шлицевых; *г* – винтовых шлицевых; *д* – шпоночных пазов; *1* – сферическая опора; *2* – протяжка; *3* – заготовка; *4* – направляющая втулка

При установке на сферическую опору заготовка самоустанавливается по оси протяжки, но торец может получиться не перпендикулярным оси отверстия, поэтому такую установку применяют, если торец заготовки обрабатывается после протягивания. При установке на плоскую опору торец перпендикулярен оси отверстия, но возможна поломка протяжки из-за разницы припусков в диаметральной плоскости протяжки. Многогранные отверстия протягивают многогранными протяжками (рис. 10.35, б). В заготовке сверлят круглое отверстие. В зависимости от величины припуска на обработку применяют ту или иную схему срезания припуска. Шлицевые отверстия получают шлицевыми протяжками. Нарезание прямых шлицов ведут при прямолинейном главном движении (рис. 10.35, в), при нарезании винтовых шлицов (рис. 10.35, г) протяжке придают дополнительное движение для получения винтового движения резания. Шпоночные или иные пазы протягивают шпоночными протяжками (рис. 10.35, д). Профиль поперечного сечения зуба должен соответствовать профилю поперечного сечения паза.

Заготовку устанавливают на плоскую опору, для направления протяжки 2 применяют направляющую втулку 4.

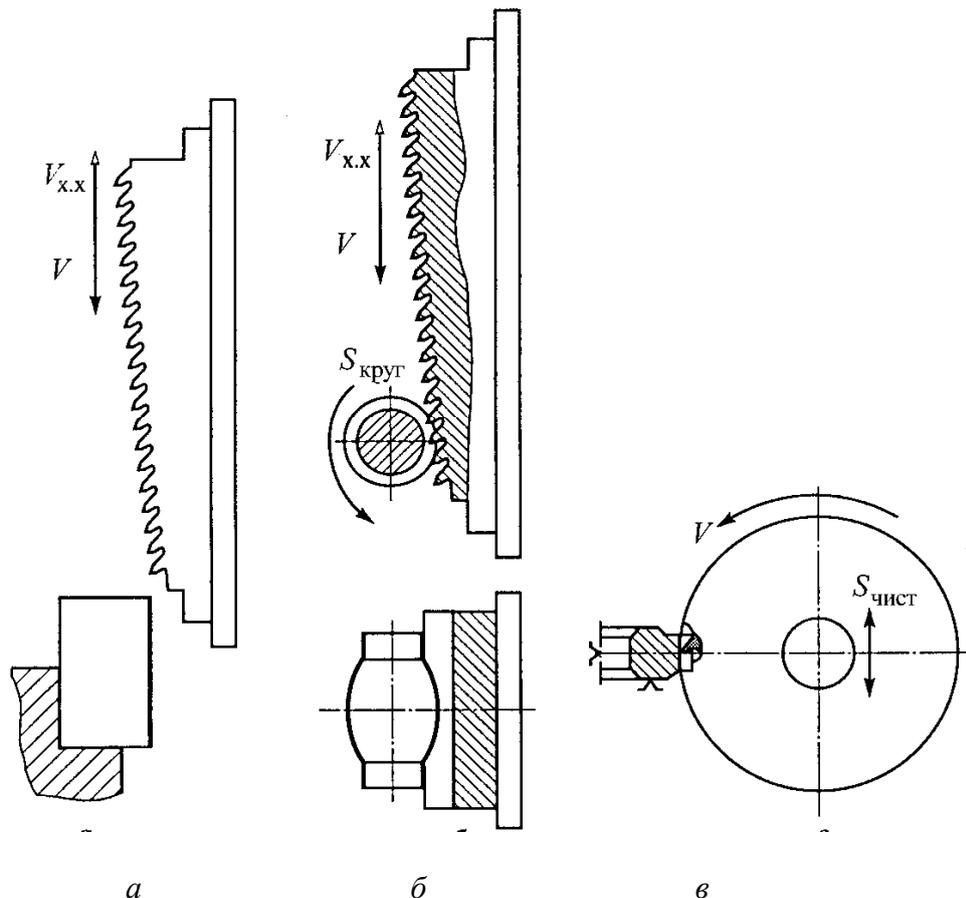


Рис. 10.36. Схемы протягивания наружных поверхностей:
а – плоских; *б* – фасонных; *в* – фрезопроотягивание

Наружные поверхности с прямолинейной образующей обрабатывают на вертикально-протяжных станках ([рис. 10.36, а, б](#)).

Сложные фасонные поверхности в крупносерийном производстве обрабатывают круговыми протяжками. Для получения прямолинейной образующей применяют два вида инструмента: протяжки с подвижным (ползун или качалка) элементом или без подвижного элемента. Если на подвижном элементе размещены чистовые зубья, выполняют кругодиагональное, или совмещенное, протягивание. При работе чистовых зубьев протяжке без подвижного элемента сообщают прямолинейное дополнительное движение ([рис. 10.36, в](#)) вдоль образующей обработанной поверхности – фрезопроотягивание.

10.6.3. Протяжные станки

Станки для протягивания отличаются простотой конструкции и большой жесткостью. Это объясняется тем, что в станках отсутствует цепь движения подачи. Основными характеристиками протяжного станка

являются тяговое усилие на штоке и ход штока рабочего цилиндра.

Горизонтально-протяжной станок (рис. 10.37, *а*) – станок для протягивания внутренних поверхностей. На станине *1* расположены гидроцилиндр *3* и насосная станция *2*. На переднем конце штока *4* установлен захват *5* с кареткой *7*, которая может перемещаться по направляющим станины. Протяжка устанавливается в захвате *5* и протаскивается сквозь отверстие в заготовке, опирающейся торцом на опорную поверхность кронштейна *6*. Поступательное движение протяжке сообщается до тех пор, пока она не выйдет из отверстия в заготовке. Заготовка падает в поддон *8*. Протяжка возвращается в исходное положение, и процесс повторяется.

Вертикально-протяжной станок (рис. 10.37, *б*) – станок для обработки наружных поверхностей. На станине *1* установлена вертикальная колонна *9* с рабочим гидроцилиндром, насосной станцией *2* и кареткой *7*. На левом конце станины расположен стол *10*, в рабочем приспособлении которого устанавливают заготовку. Протяжку закрепляют в каретке. Гидроцилиндр перемещает протяжку сверху вниз (рабочий ход).

Протяжные горизонтальные станки непрерывной обработки (рис. 10.38, *а*) применяются в крупносерийном производстве. На станине *1* установлены вертикальные стойки *2* и *5*, соединенные траверсой *4*. На траверсе подвешен инструментальный стол *6* с неподвижными секциями протяжки *9*. Заготовки *7* устанавливаются в рабочих приспособлениях, размещенных на замкнутой цепи *3*. Жесткая направляющая *8* стола обеспечивает перемещение цепи с заготовками параллельно протяжке.

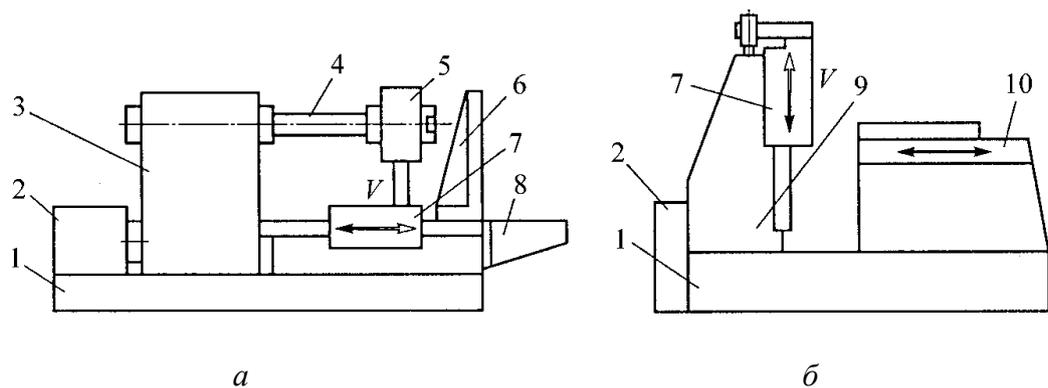


Рис. 10.37. Протяжные станки: *а* – горизонтально-протяжной; *б* – вертикально-протяжной; *1* – станина; *2* – насосная станция; *3* – гидроцилиндр; *4* – шток; *5* – захват; *6* – кронштейн; *7* – каретка; *8* – поддон; *9* – вертикальная колонна; *10* – стол; *V* – движение резания

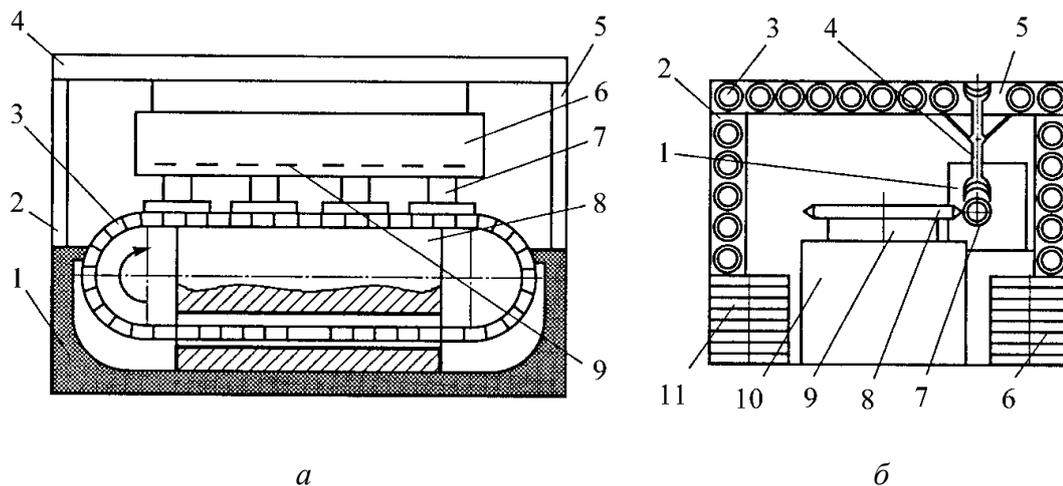


Рис. 10.38. Специальные протяжные станки: *а* – станок непрерывной обработки: 1 – станина; 2, 5 – вертикальные стойки; 3 – цепь; 4 – траверса; *б* – инструментальный стол; 7 – заготовка; 8 – направляющая стола; 9 – секция протяжки; *б* – станок для кругодиагонального протягивания зубчатых венцов: 1 – бабка изделия; 2 – вертикальный конвейер; 3 – заготовка; 4 – автооператор; 5 – горизонтальный конвейер; 6 – магазин деталей; 7 – шпиндель изделия; 8 – круговая протяжка; 9 – инструментальный шпиндель; 10 – станина; 11 – магазин заготовок

Станки для кругодиагонального (совмещенного) протягивания зубчатых венцов (рис. 10.38, *б*) применяют для нарезания прямозубых цилиндрических колес в крупносерийном производстве. На станине 10 станка размещены инструментальный шпиндель 9 и бабка изделия 1, внутри станины находится механизм главного движения. Круговая протяжка 8 крепится на шпинделе 9.

Бабка изделия 1 установлена на направляющих станины с возможностью перемещения в радиальном направлении относительно протяжки. Внутри бабки изделия размещены гидроцилиндр и делительный механизм (мальтийский крест). Гидроцилиндр перемещает бабку изделия к протяжке в начале обработки и от протяжки – в конце обработки всего зубчатого венца. После обработки очередной впадины между зубьями заготовка совершает делительный поворот с помощью делительного механизма. Необработанные заготовки размещаются в левом штыревой магазине 11. По левому вертикальному 2 и горизонтальному 5 конвейерам заготовка 3 подается к автооператору 4 и устанавливается на шпиндель 7. Обработанная заготовка устанавливается автооператором на правый вертикальный конвейер и подается в штыревой магазин 6.

10.6.4. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на протяжных станках

Технологические и нетехнологические конструкции представлены на рис. 10.39.

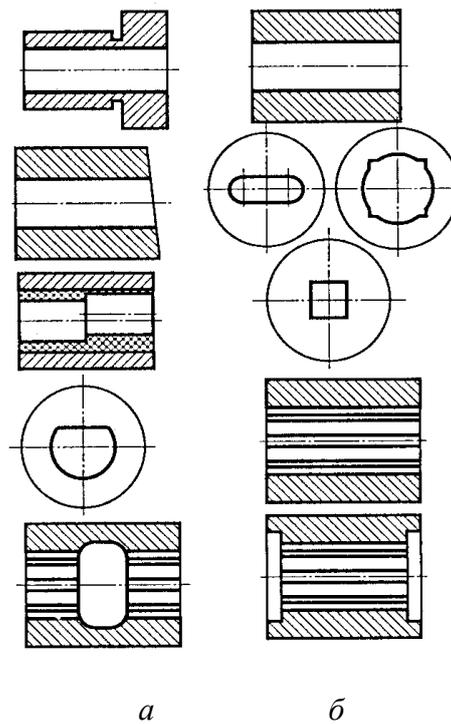


Рис. 10.39. Технологические требования к заготовкам, обрабатываемым на протяжных станках: *а* – нетехнологичные конструкции; *б* – технологичные конструкции

Протягивать отверстия можно только в жестких заготовках. Заготовки должны иметь достаточно толстые стенки с равномерной толщиной по диаметру. При протягивании отверстий в тонкостенных заготовках с буртиком по длине заготовки возникает неравномерная деформация, приводящая к искажению формы отверстия. Торцы отверстия должны быть перпендикулярны к оси отверстия. Протягивание отверстия с наклонными торцами вызывает неравномерную нагрузку на протяжку и ее перекос. При протягивании отверстия в длинных заготовках предварительное сверление отверстия необходимо вести на проход.

При сверлении отверстия двумя сверлами навстречу друг другу возможно несовпадение осей отверстий, неравномерный припуск под протягивание на сторону и поломка протяжки. Не рекомендуется протягивать фасонные отверстия со сложным профилем.

Профиль отверстия необходимо максимально упрощать и делать симметричным. Протяжки для обработки несимметричного профиля сложно профилировать и затачивать. Наиболее технологичны отверстия с неполной поверхностью боковых сторон и квадратного сечения. При этом отверстие в заготовке сверлят или растачивают до требуемого диаметра, далее протягивают только уголки. Шлицевые отверстия не должны иметь выточек, наличие которых приведет к неравномерности припуска на сторону и заклиниванию протяжки.

10.7. Обработка заготовок на фрезерных станках

Фрезерование – лезвийная обработка резанием линейчатых поверхностей многозубым инструментом – фрезой; главное движение, вращательное, придается инструменту, движение подачи, прямолинейное, придается заготовке в направлении любой из координатных осей.

Поверхность называется *линейчатой*, если ее можно описать движением прямой (образующей) по некоторой линии (направляющей). Она представляет собой совокупность прямых, зависящих от одного параметра.

Фреза – цилиндрический многозубый инструмент с зубьями на торце и/или образующей.

10.7.1. Схемы обработки поверхностей на станках фрезерной группы

Рассмотрим схемы обработки поверхностей на универсальных горизонтально-фрезерном (ГФС; имеет горизонтальную ось вращения фрезы) и вертикально-фрезерном (ВФС; имеет вертикальную ось вращения фрезы) станках.

Горизонтальные плоскости фрезеруют цилиндрическими фрезами на ГФС (рис. 10.40, *а*) или торцевыми фрезами на ВФС (рис. 10.41, *а*). Горизонтальные плоскости чаще обрабатывают торцевыми насадными фрезами, так как они имеют более жесткое закрепление и обеспечивают плавное, безвибрационное резание. При большой ширине обрабатываемой плоскости используют торцевые фрезы и обработку ведут в несколько последовательных рабочих ходов. Узкие горизонтальные плоскости удобно обрабатывать концевыми фрезами.

Вертикальные плоскости на ГФС обрабатывают торцевыми насадными фрезами (рис. 10.40, *б*) или фрезерными головками, а на ВФС – концевыми фрезами (рис. 10.41, *б*). Большие по высоте вертикальные плоскости удобнее обрабатывать на ГФС с использованием вертикальной подачи. Обработку небольших по высоте вертикальных плоскостей можно обрабатывать на ГФС с помощью концевых или дисковых фрез. Наклонные плоскости небольшой ширины обрабатывают на ГФС одноугловой фрезой (рис. 10.40, *в*).

Широкие наклонные плоскости обрабатывают на ВФС с поворотом шпиндельной головки (рис. 10.41, *в*) торцевой насадной или концевыми фрезами. Одновременную обработку нескольких поверхностей (вертикальных, горизонтальных и наклонных) ведут на ГФС (рис. 10.40, *г*), установив на оправку набор фрез.

Горизонтальные уступы и пазы обрабатывают дисковыми односторонними (рис. 10.40, *д*) и трехсторонними (рис. 10.42, *а*) фрезами на ГФС или концевыми фрезами (рис. 10.41, *г*; 10.42, *б*) на ВФС. Фасонные пазы с криволинейной образующей обрабатывают на ГФС фасонными дисковыми фрезами (рис. 10.42, *в*). Пазы типа «ласточкин хвост» или Т-образные обрабатывают на ВФС (рис. 10.42, *г, д*). Вначале концевой фрезой получают прямоугольный паз, затем используют концевую одноугловую фрезу или специаль-

ную концевую фрезу для Т-образных пазов. Шпоночные пазы для сегментных шпонок фрезеруют на ГФС дисковой трехсторонней фрезой (рис. 10.42, е), для прямоугольных шпонок – на ВФС концевой фрезой (рис. 10.42, ж).

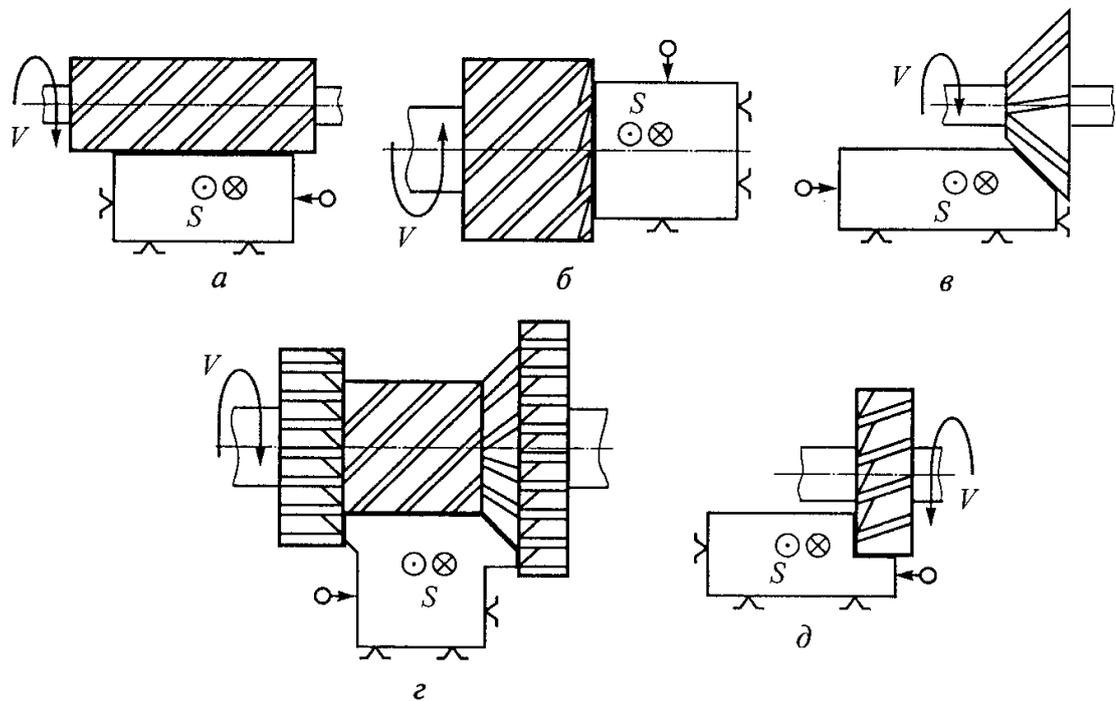


Рис. 10.40. Обработка плоскостей на ГФС: а – горизонтальных; б – вертикальных; в – наклонных; з – нескольких плоскостей одновременно; д – уступов

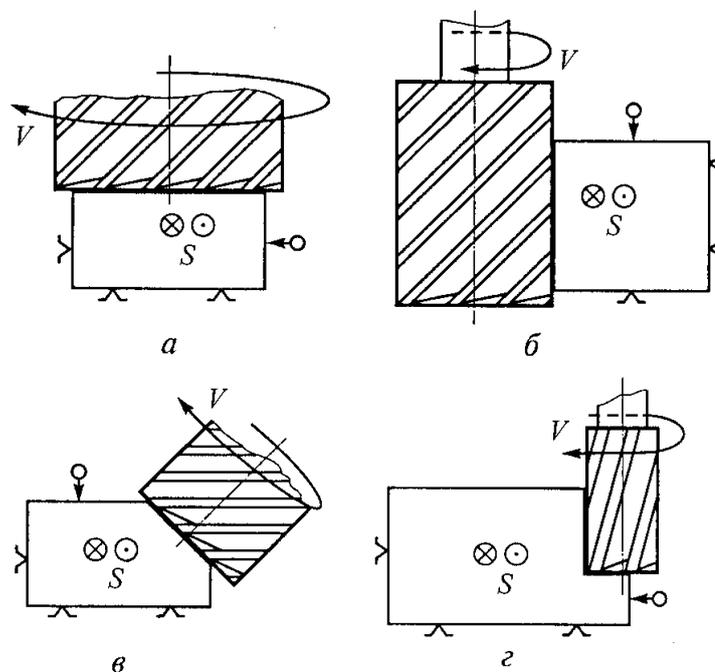


Рис. 10.41. Обработка плоскостей на ВФС: а – горизонтальных; б – вертикальных; в – наклонных; з – уступов

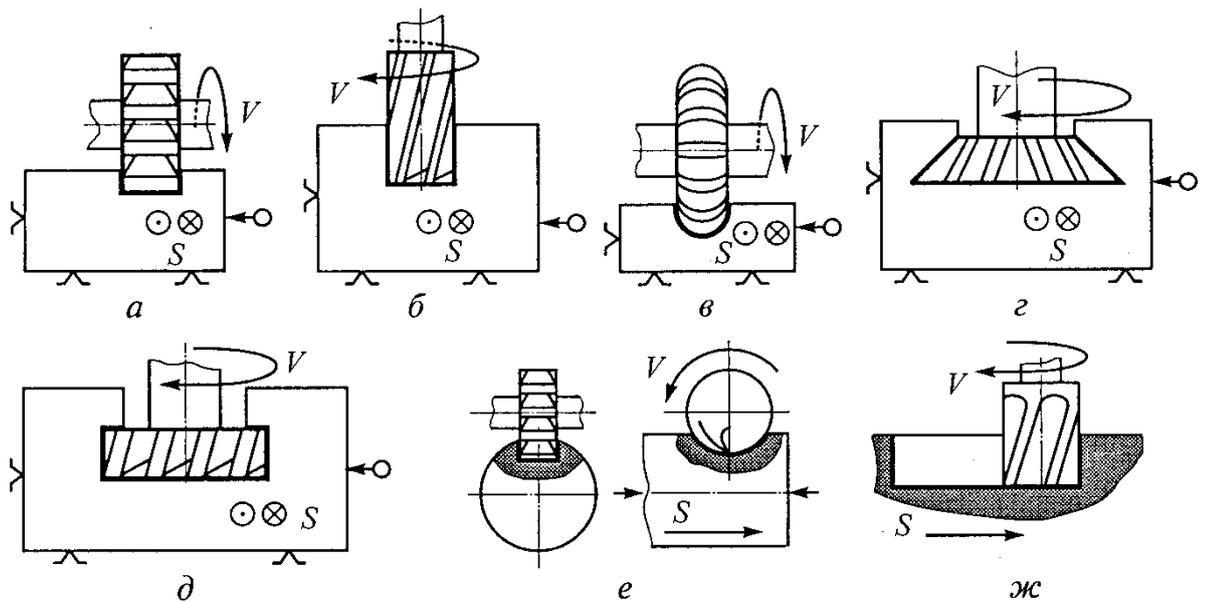


Рис. 10.42. Фрезерование пазов: *а, б* – прямоугольных; *в* – полукруглых; *г* – типа «ласточкин хвост»; *д* – Т-образных; *е, ж* – шпоночных

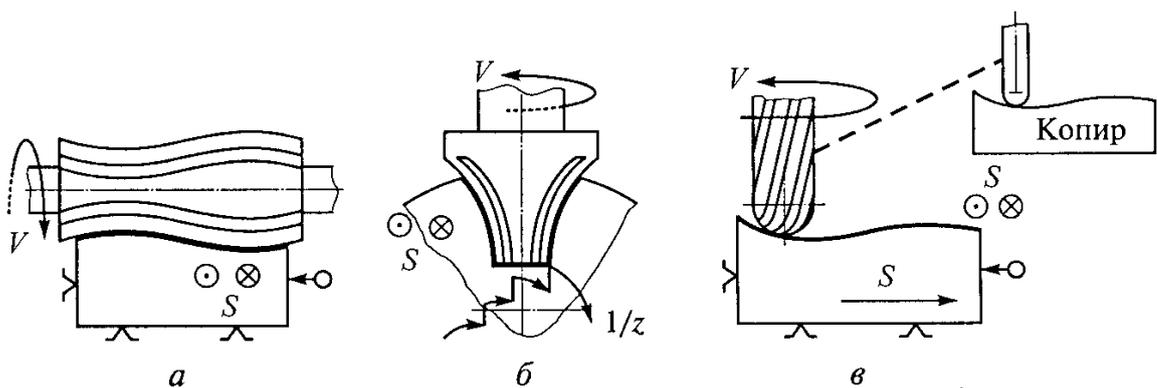


Рис. 10.43. Фрезерование фасонных поверхностей: *а, б* – методом копирования цилиндрической и концевой (пальцевой) фрезой соответственно; *в* – по копиру

Фасонные поверхности обрабатывают методом копирования с использованием фасонных цилиндрических ([рис. 10.43, а](#)), дисковых или концевых ([рис. 10.43, б](#)) фрез, по копиру на специальных копировальных фрезерных станках ([рис. 10.43, в](#)) и методом обката на специальных станках.

10.7.2. Схемы фрезерования

Цилиндрическое и торцевое фрезерование в зависимости от направления движений резания и подачи можно осуществить двумя способами: попутным фрезерованием, когда совпадают направления главного движения и движения подачи, и встречным фрезерованием, когда направления главного движения и движения подачи не совпадают.

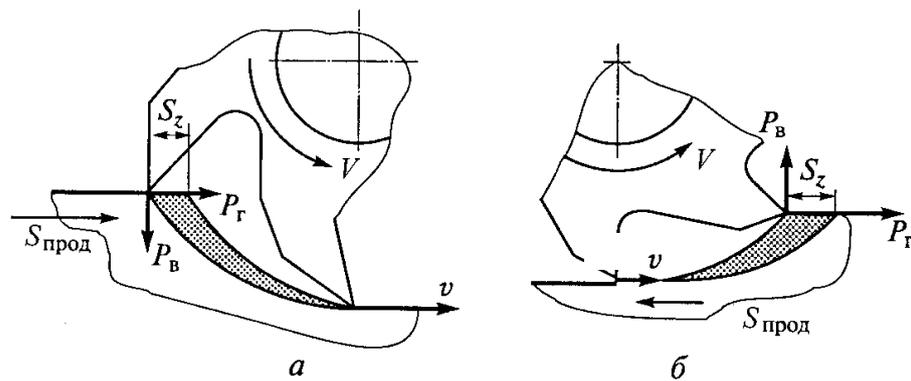


Рис. 10.44. Фрезерование: *а* – попутное; *б* – встречное; P_H и P_V – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие силы резания

При попутном фрезеровании (рис. 10.44, *а*) толщина срезаемого слоя изменяется от максимальной до нуля, зуб врезается в заготовку с ударом. Горизонтальная составляющая силы резания направлена по подаче, а вертикальная – вниз, на заготовку. При встречном фрезеровании (рис. 10.44, *б*) толщина срезаемого слоя изменяется от нуля до максимальной (зуб плавно врезается в заготовку). Горизонтальная составляющая силы резания направлена против подачи, а вертикальная – вверх.

Рациональность использования какой-либо схемы обусловлена требованием к качеству обработки, условиями обработки заготовки и состоянием фрезерного станка. При черновой обработке литых заготовок (особенно литья в песчано-глинистые формы), имеющих твердую поверхностную корку, применение попутного фрезерования нерационально, так как удар зуба фрезы об эту корку приводит к его выкрашиванию или поломке. Лучше использовать встречное фрезерование: зуб начинает работу в мягком материале сердцевины заготовки и, подходя к корке, взламывает ее. При чистовом фрезеровании, наоборот, рациональнее использовать попутное фрезерование.

Теоретически при встречном фрезеровании резание начинается с нулевой толщины срезаемого слоя, которая постепенно увеличивается. Однако режущая кромка зуба фрезы имеет радиус округления, равный 0,03–0,05 мм. При чистовом фрезеровании толщина резания невелика. В начале резания зуб не режет, а скользит по обрабатываемой поверхности без снятия стружки. При этом создаются значительные напряжения сжатия в поверхностных слоях заготовки, приводящие к значительному наклепу, повышенному истиранию режущей кромки зуба, вибрациям в системе СПИД и плохому качеству обработанной поверхности. При попутном фрезеровании толщина срезаемого слоя невелика, поэтому ударное вхождение зуба в материал заготовки не вызывает существенных колебаний в системе СПИД, что способствует стабильной работе фрезы, а шероховатость обработанной поверхности улучшается на один класс. Особенно эффективно попутное фрезерование при обработке вязких материалов, склонных к наклепу и налипанию.

При обработке встречным фрезерованием горизонтальных плоскостей нежестких заготовок или заготовок относительно небольшой толщины (до 30

мм) вертикальная составляющая силы резания будет отрывать заготовку от стола, что может привести к неравномерности глубины срезаемого слоя (большая погрешность обработки по толщине заготовки) или к большим усилиям на закрепление заготовки (возможны деформации заготовки). Лучше использовать попутное фрезерование, когда вертикальная составляющая силы резания прижимает заготовку к столу.

При обработке заготовок на изношенных станках применение попутного фрезерования приводит к прерывистости процесса резания. Причины этого явления лежат в конструктивном исполнении механизма движения подачи стола. Для преобразования вращательного движения в поступательное используется пара «винт – гайка». Этот механизм выполнен с зазорами по резьбе, и чем более изношен станок, тем больше эти зазоры. При направлении горизонтальной составляющей силы резания по подаче гайка, связанная со столом, обгоняет винт в пределах зазоров в резьбе. При больших зазорах процесс резания прерывается. Когда винт «догонит гайку», резание возобновится. Процесс прерывания циклически повторяется. Для плавного резания необходимо использовать станки со специальными гидравлическими компенсаторами зазоров в паре «винт – гайка», станки с беззазорными шарико-винтовыми парами или применять встречное фрезерование, при котором горизонтальная составляющая силы резания прижимает гайку к винту и процесс резания становится непрерывным.

10.7.3. Особенности процесса и режимы резания при фрезеровании

Особенностями процесса фрезерования является прерывистый характер процесса резания каждым зубом фрезы и переменность толщины срезаемого слоя. Каждый зуб фрезы участвует в резании только на определенной части оборота фрезы, остальную часть проходит по воздуху, вхолостую, что обеспечивает охлаждение зуба и дробление стружки.

При цилиндрическом фрезеровании плоскостей работу резания осуществляют зубья, расположенные на цилиндрической поверхности фрезы. При торцевом фрезеровании плоскостей работу резания осуществляют зубья, расположенные на цилиндрической и торцевой поверхностях фрезы.

К режимам резания при фрезеровании относят скорость резания, подачу (минутную, на оборот и на зуб), глубину резания и ширину фрезерования B . Скорость резания, мм/мин, рассчитывается как окружная скорость вращения фрезы:

$$V = \pi D_{\phi} n / 1000,$$

где D_{ϕ} – наружный диаметр фрезы, мм; n – частота вращения шпинделя станка, об/мин.

Влияние диаметра фрезы на производительность обработки неоднозначно. С увеличением диаметра фрезы повышается расчетная скорость резания при постоянной стойкости. Это объясняется тем, что уменьшается

средняя толщина срезаемого слоя, улучшаются условия охлаждения зуба фрезы, так как удлиняется время нахождения зуба вне зоны резания.

С целью повышения производительности лучше выбирать фрезы большего диаметра, поскольку с увеличением скорости резания пропорционально увеличивается частота вращения фрезы и минутная подача (при пропорциональном увеличении числа зубьев фрезы). Возможности увеличения диаметра фрез ограничиваются мощностью и жесткостью станка, размерами инструментального отверстия в шпинделе станка.

10.7.4. Силы резания

В процессе работы фреза должна преодолеть суммарные силы резания, действующие на каждый зуб, находящийся в контакте с заготовкой. При фрезеровании цилиндрической прямозубой фрезой (рис. 10.45, а) равнодействующую силу резания P можно разложить на окружную составляющую P_z , касательную к траектории движения зуба, и на радиальную составляющую P_y , направленную по радиусу. Силу P можно также разложить на вертикальную P_v и горизонтальную P_r составляющие. При фрезеровании цилиндрическими косозубыми фрезами в осевом направлении действует осевая сила P_o (рис. 10.45, б), причем чем больше угол наклона винтовых канавок фрезы ω , тем она больше.

Осевая сила может сдвинуть фрезу вдоль оправки, поэтому часто применяют набор из двух фрез с разным направлением зубьев или одну шевронную фрезу. В этом случае осевые силы уравниваются друг друга. Окружная сила P_z производит основную работу резания, по ней определяют эффективную мощность N и рассчитывают детали и узлы механизма главного движения (коробки скоростей) на прочность.

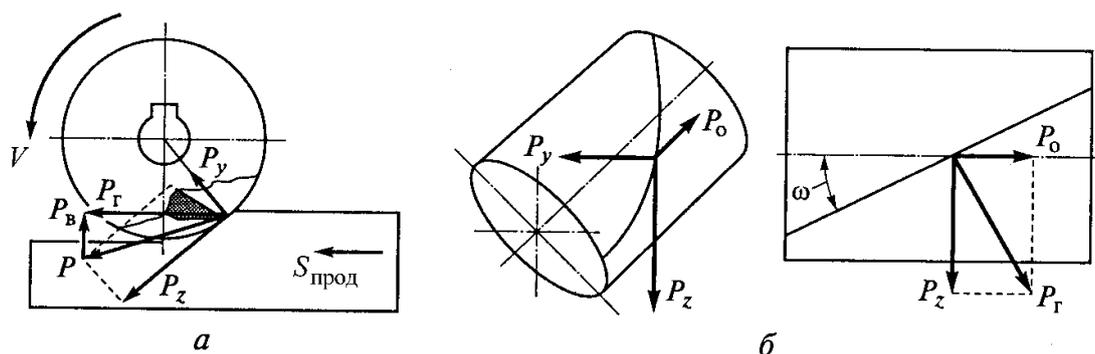


Рис. 10.45. Силы резания при фрезеровании: а – разложение силы резания P на составляющие; б – осевая сила P_o ; P_x , P_y , P_z – составляющие силы резания на координатные оси; P_v , P_r – соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие силы резания; ω – угол наклона зуба фрезы

Радиальная сила $P_y = (0,6-0,8)P_r$ действует на подшипники шпинделя и изгибает оправку, на которой устанавливается фреза. Осевая сила $P_o = (0,35-0,55)P_z$ действует на подшипники шпинделя и механизм поперечной подачи

станка. Горизонтальная P_r и вертикальная P_v силы действуют на механизмы продольной и вертикальной подачи станка. Окружную силу, N , рассчитывают по эмпирической формуле

$$P_z = C_P t^{Y_P} S_z^{X_P} B D_\phi^q,$$

где C_P – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и условия обработки; S_z – подача на зуб, мм/зуб; t – глубина резания, мм; B – ширина резания, мм; D_ϕ – диаметр фрезы, мм; X_P , Y_P , q – показатели степени (берутся из справочной литературы).

Крутящий момент M и эффективную мощность N рассчитывают по формулам

$$M = P_z D_\phi / 2000; N = Mn / (1000 \cdot 60),$$

где n – число оборотов шпинделя станка, об/мин.

10.7.5. Элементы и геометрия фрез

На [рис. 10.46, а](#) показана цельная цилиндрическая косозубая фреза, состоящая из корпуса 2 и режущих зубьев 7. Зуб фрезы имеет переднюю 3 и заднюю 6 поверхности, спинку 7, ленточку 5 и главную режущую кромку 4. Режущее лезвие зуба торцевой фрезы ([рис. 10.46, б](#)) имеет более сложную форму. Торцевая фреза состоит из главной режущей кромки 4, переходной кромки 8 и вспомогательной кромки 9.

Фрезы общего назначения выполняются с острозаточенной задней поверхностью и затылованные. Спинка острозаточенного зуба может быть одноугловой, двухугловой (сечение А–А) и криволинейной. Одноугловая форма наиболее проста в изготовлении и применяется для торцевых и фасонных фрез, фрез с малым числом зубьев. Двухугловая форма обеспечивает большую прочность зуба, применяется для дисковых и твердосплавных фрез. Спинка затылованного зуба очерчена дугой окружности. Криволинейная форма обеспечивает наивысшую прочность зуба и применяется для концевых фрез. Высота зуба h и форма впадины между зубьями, особенно радиус впадины r , – важные параметры фрезы, влияющие на прочность зуба. Для размещения стружки необходимо соблюдать условие

$$r \geq \sqrt{S_z t}.$$

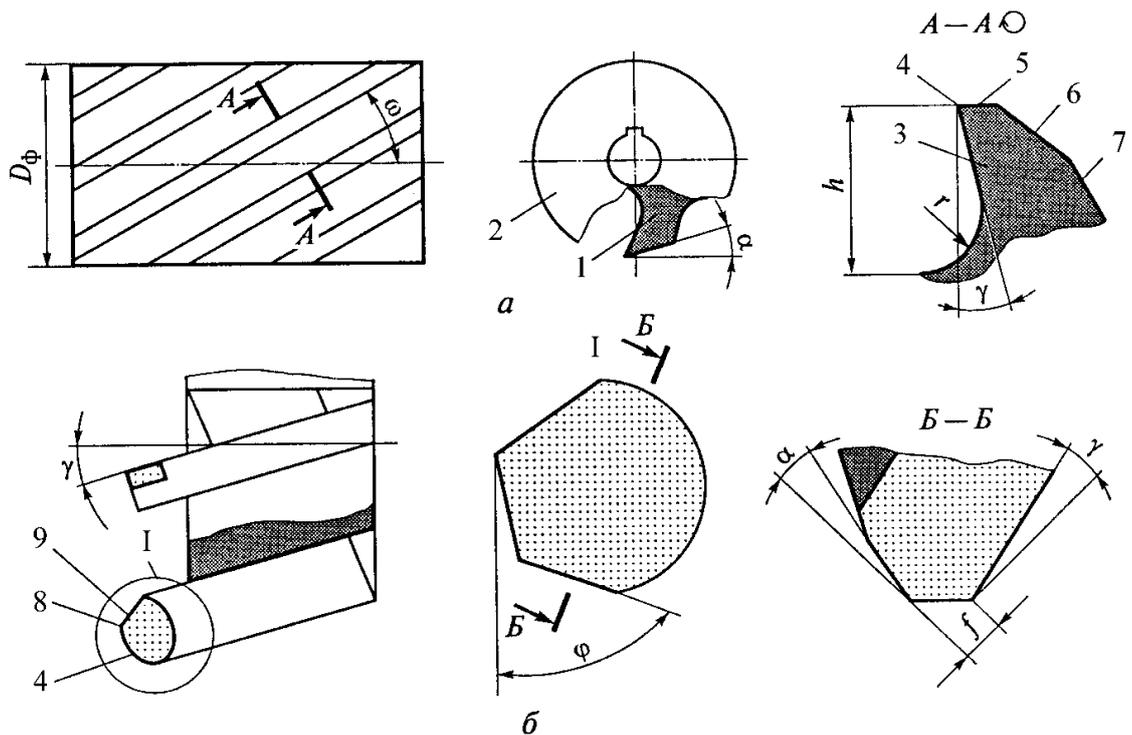


Рис. 10.46. Углы заточки фрез: *a* – цилиндрических; *б* – торцевых; 1 – режущий зуб; 2 – корпус фрезы; 3 – передняя поверхность; 4 – главная режущая кромка; 5 – ленточка; 6 – задняя поверхность; 7 – спинка зуба; 8 – переходная кромка; 9 – вспомогательная кромка; *f* – фаска; *h* – высота зуба; *r* – радиус впадины между зубьями; α , γ , φ – углы резания; D_{ϕ} – диаметр фрезы; ω – угол наклона зуба фрезы

Стандартные фрезы выполняются с нормальным (мелким) и крупным зубом. Фрезы с нормальным зубом предназначены для работы с облегченными режимами резания. Благодаря большому числу зубьев производительность их выше, чем у фрез с крупным зубом, которые применяются при обработке глубоких пазов, уступов и плоскостей в заготовках из алюминиевых и медных сплавов, при обработке стальных заготовок на нежестких станках.

Передний угол γ , измеряемый в сечении А–А, перпендикулярном главной режущей кромке, влияет на деформации срезаемого слоя и прочность режущего лезвия. Чем больше этот угол, тем меньше деформации срезаемого слоя, меньше силы резания и ниже температура, но уменьшается и прочность зуба. Главный задний угол α измеряется в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Для фрез он принимается несколько большим, чем для токарных резцов (для фрез условия трения и изнашивания на задней поверхности хуже). При толщине срезаемого слоя до 0,08 мм $\alpha = 18\text{--}20^\circ$, при толщине срезаемого слоя более 0,08 мм $\alpha = 12\text{--}15^\circ$. Главный угол в плане φ влияет на ширину и толщину срезаемого слоя, на соотношение составляющих силы резания, на прочность вершины зуба. С уменьшением этого угла увеличивается активная длина главной режущей кромки, уменьшается толщина срезаемого слоя, повышается стойкость фрезы. Если оставить стойкость неизменной, можно повысить скорость резания и величину подачи на зуб.

Фрезы с малыми углами φ рекомендуется применять при работе на станках повышенной жесткости при небольшой глубине срезаемого слоя.

Концевые, дисковые и пазовые фрезы выполняются с постоянным углом φ , равным 90 или 60° , поэтому упрочнить режущую кромку можно за счет заточки переходной режущей кромки (фаски f) под углом φ , равным 45 или 30° . Выполнение зубьев по винтовой линии под углом ω обеспечивает плавность врезания зуба и равномерность фрезерования. При этом увеличивается фактический передний угол, измеряемый в направлении схода стружки, что облегчает процесс резания, не уменьшая прочностных свойств зуба. Например, увеличение угла наклона винтовой канавки (угла наклона зубьев) ω с 10 до 60° увеличивает стойкость фрезы в 3–5 раз.

10.7.6. Типы фрез

Промышленностью выпускаются фрезы диаметром 20–320 мм, шириной 0,2–6 мм, с числом зубьев 14–160. В зависимости от числа зубьев фрезы разделены на три типа: тип 1 – фрезы с мелким зубом; тип 2 – со средним зубом; тип 3 – с крупным зубом. Фрезы с мелким зубом характеризуются большим числом зубьев. Передняя и задняя поверхности образованы канавкой с углом 60° . Зуб фрезы имеет низкую прочность, поэтому фрезы применяются для работы с глубиной резания, не превышающей ширины фрезы (мелкие пазы, неглубокие канавки и шлицы, отрезание тонких листов). Фрезы со средним зубом имеют по сравнению с фрезами первого типа примерно в два раза меньше зубьев, т. е. более емкую стружечную канавку.

Выпускаются две формы зуба: форма 1 аналогична форме зубьев мелкозубых фрез, зуб формы 2 снабжен ленточкой по задней поверхности (вспомогательный задний угол 20°). Применение ленточки шириной 0,5–1 мм позволяет обрабатывать более глубокие пазы с большими подачами на зуб. Фрезы с крупным зубом имеют примерно в два раза меньше зубьев, чем фрезы типа 2.

Цилиндрические фрезы имеют зубья только на образующей. Они обычно используются в наборе из двух и более фрез. Для обработки ступенчатых поверхностей заготовок промышленностью выпускаются цельные цилиндрические фрезы из быстрорежущей стали и сборные цилиндрические фрезы, оснащенные пластинами из твердого сплава. Быстрорежущие фрезы выпускаются двух типов: тип 1 – с мелким зубом; тип 2 – с крупным зубом. Тип 1 используется для получистовой и чистовой обработки плоскостей, тип 2 – для черновой обработки.

Дисковые фрезы бывают пазовые, двухсторонние (с зубьями на образующей и одном из торцов), трехсторонние (с зубьями на образующей и обоих торцах), одноугловые, двухугловые, полукруглые выпуклые, полукруглые вогнутые, прорезные (шлицевые) и отрезные.

Трехсторонние дисковые фрезы предназначены для фрезерования пазов по 9-му качеству и уступов в стальных и чугунных заготовках. Выпускаются фрезы с прямыми зубьями и с разнонаправленными зубьями, угол

наклона зубьев 15° . Геометрические параметры режущей части: передний угол 15° ; задний угол периферийных зубьев 20° , торцевых 6° . Недостатком этих фрез является их сложная заточка, выполняемая как по диаметру, так и по торцам, при этом теряется размер по ширине фрезы после переточки.

Пазовые фрезы более просты по конструкции, чем трехсторонние. Для сохранения размера фрезы по ширине при переточке зубья на торцевых режущих кромках выполнены без вспомогательного угла в плане и имеют длину 1 мм, поэтому переточка фрезы выполняется только по главной режущей кромке.

Угловые фрезы предназначены для обработки пазов, скосов и винтовых поверхностей на режущем инструменте. Фрезы с углом $\varphi = 50\text{--}85^\circ$ имеют угол φ_1 (см. [рис. 10.5](#)), равный 15° ; при $\varphi = 90^\circ$ $\varphi_1 = 20^\circ$; при $\varphi = 100^\circ$ $\varphi_1 = 25^\circ$.

Полукруглые выпуклые и вогнутые фрезы предназначены для фрезерования фасонных (полукруглых) канавок и выступов, выпускаются диаметром 50–130 мм и радиусом профиля канавки (выступа) 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 14; 16; 18; 20 и 25 мм.

Прорезные (шлицевые) и отрезные фрезы предназначены для обработки узких канавок или отрезания (разрезания) материала. Они работают в очень неблагоприятных условиях: нежесткая рабочая часть, наличие двух боковых (вспомогательных) режущих кромок при малой главной режущей кромке, стесненные условия образования и отвода стружки – все это приводит к частым поломкам фрез, вибрациям при резании, выбору малых подач на зуб (0,002–0,02 мм/зуб).

Прорезные фрезы с крупным зубом применяются для прорезки глубоких пазов в заготовках из вязких материалов, нержавеющей и жаропрочных сталей.

Дисковые фрезы с вставными пластинами из быстрорежущей стали, с вставными или напаянными пластинами из твердого сплава используют для обработки уступов и пазов. Применение вставных пластин удешевляет и упрощает переточку фрезы, обеспечивает уменьшение расхода дорогостоящих инструментальных материалов. Применение твердого сплава позволяет повысить скорость резания, а следовательно, и производительность обработки.

Торцевые фрезы более универсальны, чем цилиндрические. В основном их применяют для обработки плоскостей. Обычно торцевые фрезы выполняются цельными из быстрорежущей стали, сборными с вставными ножами из быстрорежущей стали, сборными с вставными или напаянными пластинами из твердого сплава, сборными с механическим креплением многогранных или круглых вращающихся неперетачиваемых твердосплавных пластин.

Сборные фрезы с ножами из быстрорежущей стали выпускаются диаметром 80–250 мм, с ножами, оснащенными твердым сплавом, – диаметром 100–630 мм. Фрезы состоят из стального корпуса, в пазах которого с помощью клиньев зажимаются режущие ножи.

Сборные фрезы с механическим креплением неперетачиваемых пластин конструктивно отличаются тем, что в пазы стального корпуса вставляются резцы прямоугольного сечения, на которых механическим способом крепятся неперетачиваемые пластины. Каждый резец установлен так, что его можно перемещать вдоль пазов корпуса с помощью специального винта. Преимущества этих фрез по сравнению с фрезами с вставными ножами: повышение стойкости в 1,5–2 раза; сокращение машинного времени обработки на 25–50 %; сокращение расхода твердых сплавов; возможность использования хрупких или не поддающихся напайке твердых или иных сплавов; исключение операции заточки фрезы (после изнашивания одной грани пластины последняя поворачивается и резание происходит неизношенной гранью); возможность настройки фрезы на обработку детали определенного размера.

Концевые фрезы выполняются цельными из быстрорежущей стали или с напаянными пластинами из твердого сплава. Концевыми фрезами обрабатываются плоскости, уступы, прямоугольные и призматические пазы, криволинейные поверхности. Промышленностью выпускаются фрезы общего назначения (для обработки конструкционных сталей и чугунов) и специализированные (для обработки легких сплавов и труднообрабатываемых материалов).

Цельные фрезы из быстрорежущих сталей выполняются с цилиндрическим или коническим хвостовиком, с крупным или мелким зубом (тип 1 или 2 соответственно). Фрезы для обработки стали и чугуна выполняются со спиральными канавками с неравномерным окружным шагом. Угол наклона спирали 30–45°, передний угол 15°, задний угол 14°.

Цельные твердосплавные фрезы используются для обработки заготовок из нержавеющей, высокопрочных, жаропрочных сталей, титановых сплавов. Диаметр фрез 3–12 мм, длина режущей части 8–25 мм. Фрезы выполняются с неравномерным окружным шагом зубьев. Материал режущей части – твердые сплавы: ВК6М, ВК8, ВК10М. Геометрические параметры режущей части фрез: главные передний и задние углы 5 и 15° соответственно. Твердосплавные фрезы с напаянными пластинами выпускаются с прямыми и винтовыми канавками.

Фрезы для обработки Т-образных пазов выпускаются с цилиндрическим или коническим хвостовиком. Фрезы с цилиндрическим хвостовиком выполняются диаметром 6–24 мм; число зубьев 6 или 8; наклон зубьев 10°. Фрезы с коническим хвостовиком выпускаются в двух исполнениях. Исполнение 1 (рекомендуются для работы по чугуну): диаметр 6–28 мм; число зубьев 6 или 8; наклон зубьев 10°. Исполнение 2 (рекомендуются для работы по стали): диаметр 10–54 мм; число зубьев 4, 6 или 8; наклон зубьев 15–25°.

Шпоночные фрезы предназначены для получения шпоночных пазов под призматическую или сегментную шпонку. Промышленностью выпускаются фрезы для призматических шпонок (цельные быстрорежущие и твердосплавные; с напаянными пластинами из твердого сплава) и фрезы для

сегментных шпонок (цельные быстрорежущие). Фрезы шпоночные цельные быстрорежущие выпускаются: с цилиндрическим хвостовиком – диаметром 2–25 мм; с коническим хвостовиком – диаметром 10–40 мм. Фрезы шпоночные цельные твердосплавные выпускаются с цилиндрическим хвостовиком диаметром 2–12 мм. Фрезы с напаянными пластинами из твердого сплава имеют диаметр 10–25 мм. Фрезы для пазов сегментных шпонок выпускаются под шпонки от 4×1,0 до 10×2,5 мм.

Фасонные фрезы имеют криволинейную образующую и предназначены для обработки фасонных поверхностей. Обычно крупные предприятия, имеющие собственное ремонтно-инструментальное производство, самостоятельно изготавливают необходимые им фасонные фрезы. Промышленностью выпускаются фрезы дисковые полукруглые выпуклые и вогнутые, фрезы модульные дисковые или концевые для нарезания зубчатых венцов цилиндрических колес методом копирования.

10.7.7. Станки фрезерной группы

В условиях единичного и мелкосерийного производства широко используются универсальные консольно-фрезерные станки: горизонтально-фрезерные без поворотного стола; горизонтально-фрезерные с поворотным столом; вертикально-фрезерные.

Горизонтально-фрезерные станки с поворотным столом. На [рис. 10.47, а](#) показаны основные узлы горизонтально-фрезерного станка с поворотным столом. На фундаментной плите 1 установлена чугунная станина 2, внутри которой расположены отсек для электрооборудования, коробка скоростей 3 и шпиндельный узел 5. По верхним направляющим станины перемещается хобот 4 (может устанавливаться относительно станины с различным вылетом).

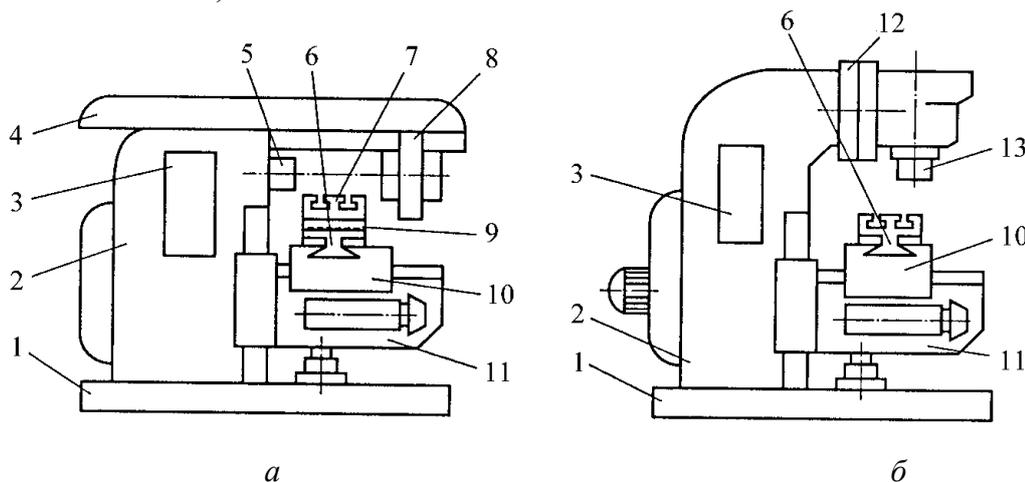


Рис. 10.47. Универсальные фрезерные станки: *а* – горизонтально-фрезерный; *б* – вертикально-фрезерный; 1 – фундаментная плита; 2 – станина; 3 – коробка скоростей; 4 – хобот; 5 – шпиндельный узел; 6 – поперечные салазки; 7 – стол; 8 – серьга; 9 – поворотные салазки; 10 – продольные салазки; 11 – консоль; 12 – поворотная планшайба; 13 – шпиндель

Серьга 8, совместно с хоботом обеспечивающая жесткость фрезерной оправки, перемещается по его направляющим и закрепляется гайкой. С помощью винтового домкрата по вертикальным направляющим станины перемещается консоль 11. По горизонтальным направляющим консоли перемещаются продольные салазки 10, по верхним направляющим которых перемещаются поперечные салазки 6, а на них установлены поворотные салазки 9 и стол 7. Вертикальное, продольное и поперечное движения подачи стола могут осуществляться вручную или коробкой подач, размещенной в консоли 11. Вращательное движение выходного вала коробки подач преобразуется в поступательное перемещение стола с помощью механизмов «ходовой винт – гайка». На верхней части стола выполнены поперечные Т-образные пазы для установки заготовки или рабочих приспособлений.

Вертикально-фрезерные станки. На [рис. 10.47, б](#) показаны основные узлы вертикально-фрезерного станка. Эти станки имеют много общих унифицированных узлов и деталей с горизонтально-фрезерными станками, но отличаются от них вертикальным расположением шпинделя 13, который можно поворачивать под углом до 45° в обе стороны с помощью поворотной планшайбы 12. На фундаментной плите 1 установлена чугунная станина 2. Внутри станины расположены отсек для электрооборудования, коробка скоростей. В верхней части станины установлена поворотная планшайба 12 с фрезерной головкой и шпинделем 13. С помощью винтового домкрата по вертикальным направляющим станины перемещается консоль 11 с продольными 10, поперечными 6 салазками и столом.

Копировально-фрезерные станки. Обработку сложных фасонных поверхностей производят концевыми фрезами на копировально-фрезерных станках. Плоские фасонные поверхности замкнутого контура с прямолинейной образующей получают контурным фрезерованием. При этом заготовке или фрезе сообщают движение в двух направлениях (продольное и поперечное движения подачи). Одно из движений является задающим (постоянным), другое – следящим, зависящим от формы копира. Профиль обработанной поверхности зависит от соотношения этих движений. Скорость перемещения фрезы относительно заготовки (результатирующая подача) должна совпадать со скоростью перемещения следящего элемента (щупа) по копиру. Объемные фасонные поверхности получают объемным копирным фрезерованием. Поверхности фрезеруют отдельными вертикальными или горизонтальными фасонными строчками. Ширина строчки соответствует диаметру концевой фрезы. После фрезерования одной строчки по принципу контурного фрезерования фрезу перемещают на ширину строчки. Следующую строчку фрезеруют на обратной подаче.

В современных копировальных станках применяются механические, электромеханические или гидравлические следящие приводы. При использовании механического следящего привода щуп жестко связан с фрезой, сила резания воспринимается копиром, что является причиной его быстрого изнашивания. Применение электромеханических или гидравлических усилителей

позволяет уменьшить давление на щуп. Малые давления щупа на копир позволяют фрезеровать крутые профили, обеспечивая высокую точность обработки.

На [рис. 10.48, а](#) показан общий вид копировально-фрезерного станка. На фундаментной плите 12 установлена станина 1. По горизонтальным направляющим станины перемещаются продольные салазки 2, по поперечным направляющим которых перемещается горизонтальный стол 3 со стойкой 4 и вертикальным столом 5, в пазах которого устанавливаются приспособление с обрабатываемой заготовкой и копир. На правой части станины установлена вертикальная стойка 11 с винтовым механизмом подачи 9. По направляющим стойки 11 перемещаются фрезерная бабка 10 с шпинделем 6 и следящий привод 8 с щупом 7.

Карусельно-фрезерные станки. В крупносерийном и массовом производстве для высокопроизводительного непрерывного фрезерования партии деталей применяют фрезерные станки непрерывного действия, для обработки заготовок небольшого размера (некруглые валы, рычаги, кронштейны) – карусельно-фрезерные станки, более крупные заготовки обрабатывают на барабанно-фрезерных станках.

Основные узлы карусельно-фрезерного станка показаны на [рис. 10.48, б](#). На станине 1 смонтирована стойка 4, по вертикальным направляющим которой перемещается фрезерная головка 10 с двумя шпинделями 6. Оба шпинделя имеют общий привод, но могут настраиваться на различные значения числа оборотов. Обычно левый шпиндель настроен на черновое фрезерование поверхности, правый – на чистовое. На круглом столе 13 (карусели) с вертикальной осью вращения в приспособлениях устанавливаются заготовки. Стол размещен в салазках 2, которые могут перемещаться по направляющим станины. При работе станка стол вращается непрерывно.

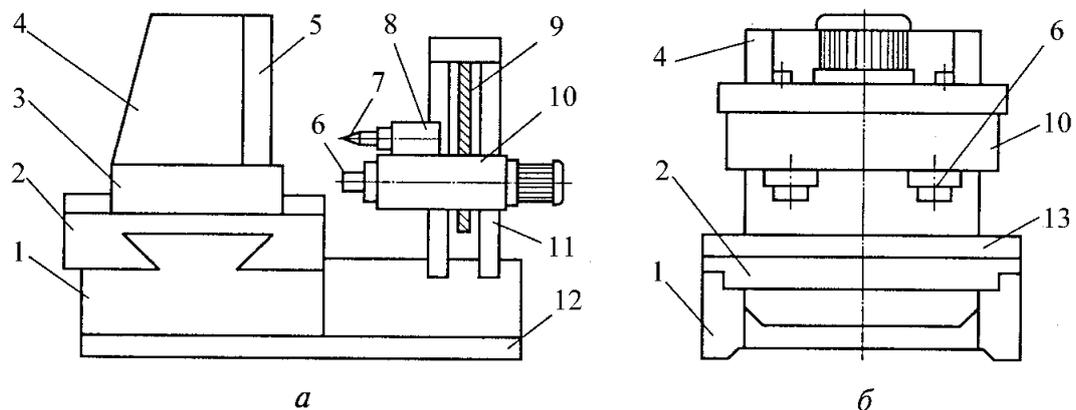


Рис. 10.48. Специальные фрезерные станки: а – копировально-фрезерный; б – карусельно-фрезерный; 1 – станина; 2 – салазки; 3 – горизонтальный стол; 4, 11 – стойки; 5 – вертикальный стол; 6 – шпиндель; 7 – щуп; 8 – следящий привод; 9 – механизм подачи; 10 – фрезерная головка (бабка); 12 – фундаментная плита; 13 – карусель

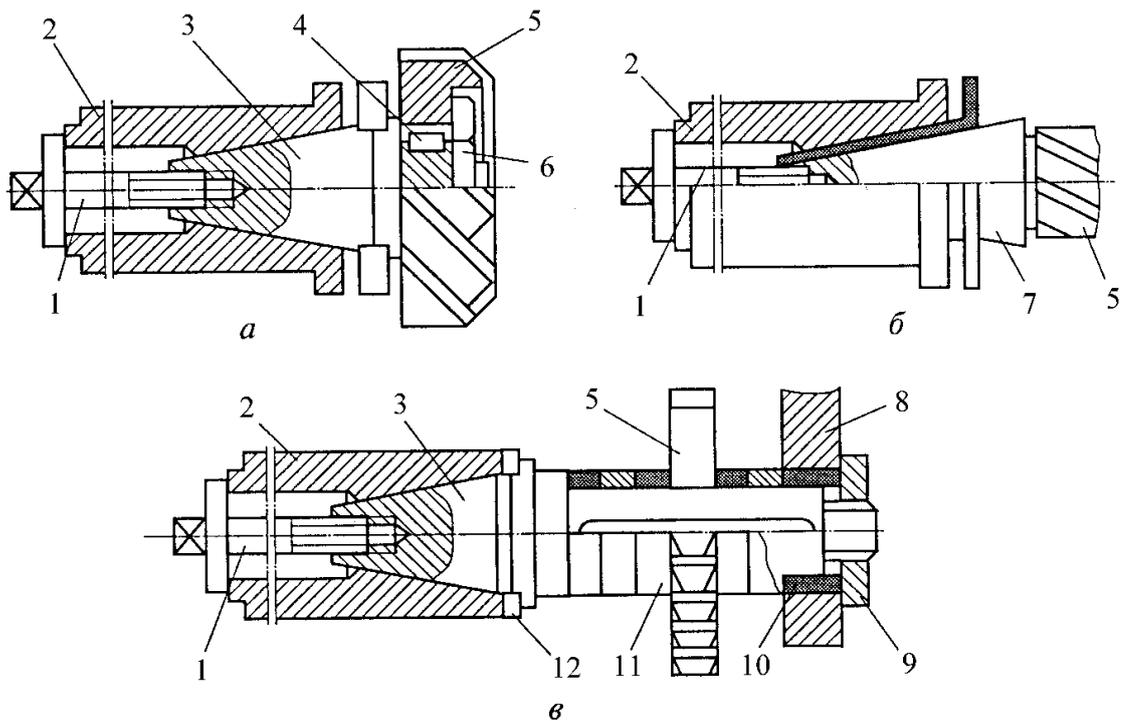


Рис. 10.49. Оправки к фрезерным станкам: *а* – для торцевых фрез; *б* – для концевых фрез; *в* – для цилиндрических фрез; 1 – винт; 2 – шпиндель; 3 – оправка; 4 – шпонка; 5 – фреза; 6, 9 – гайки; 7 – коническая втулка; 8 – серьга; 10 – подшипник; 11 – цилиндрическая втулка; 12 – сухари

Барабанно-фрезерные станки. Особенностью барабанно-фрезерных станков является наличие горизонтального барабана, на гранях которого имеются приспособления для базирования крепления заготовок. Медленным вращением барабана заготовкам придают круговую подачу. Станки оснащены несколькими фрезерными головками.

Технологическая оснастка, применяемая при фрезеровании. Для закрепления режущего инструмента применяются различные оправки. На [рис. 10.49, а](#) показана короткая оправка для закрепления торцевых и дисковых фрез. Оправка 3 устанавливается в коническое отверстие шпинделя 2 и зажимается винтом 1. Фреза 5 устанавливается на цилиндрической поверхности оправки и зажимается гайкой 6. Крутящий момент передается с помощью призматической шпонки 4.

Для установки концевых фрез применяются оправки, показанные на [рис. 10.49, б](#). Фреза 5 с помощью переходных конических втулок 7 устанавливается в шпинделе 2 и зажимается винтом 1.

На горизонтально-фрезерных станках фрезы устанавливаются на длинных оправках с коническим хвостовиком ([рис. 10.49, в](#)). Оправка 3 вставляется коническим хвостовиком в отверстие шпинделя 2 и зажимается винтом 1. Цилиндрический конец оправки через подшипник 10 устанавливается в серьге 8 и зажимается гайкой 9. Фреза 5 устанавливается на цилиндрической поверхности оправки, и ее осевое положение определяется втулками 11. Крутящий момент фрезе передается силами трения или с помощью призма-

тической шпонки. Крутящий момент от шпинделя к оправке передается сухарями 12.

Для установки, базирования и закрепления заготовок применяются универсальные приспособления: прихваты, угольники, призмы, машинные тиски. При обработке большой партии заготовок проектируются и изготавливаются специальные приспособления.

Для периодического точного поворота заготовки на заданный угол (деление заготовки) применяют механические или оптические делительные головки. Механическая делительная головка показана на [рис. 10.50, а](#). Головка состоит из корпуса 1, поворотного барабана 3 и шпинделя 6 с центром. В корпусе головки размещен червячный редуктор (передаточное отношение обычно равно 1:40). Вращение шпинделю придают рукояткой 2 с фиксатором. Передний конец шпинделя резьбовой, для установки инструмента вместо центра кулачкового патрона или поводка 7. Делительный диск 4 расположен на полом валу соосно с валом рукоятки 2. Для удобства отсчета делений имеется раздвижной сектор 8, состоящий из двух ножек, устанавливаемых таким образом, чтобы между ними располагалось нужное число отверстий делительного диска. На шпинделе 6 установлен лимб 5 для непосредственного деления заготовки на части.

Универсальная делительная головка позволяет делить заготовку тремя способами: непосредственным, простым и дифференциальным.

При непосредственном делении отсоединяют делительный диск от червячной передачи. Рукояткой 2 поворачивают шпиндель на заданный угол, отмечая его по шкале лимба. Данный способ делений имеет невысокую угловую точность, но удобен при углах 20, 30, 45, 90, 180°.

Простое деление осуществляется с помощью делительного диска. На концентрических окружностях торца диска выполнены сквозные отверстия с точным угловым шагом. Количество отверстий в каждом концентрическом ряду отмечено соответствующим числом. Шпиндель с заготовкой поворачивают вращением рукоятки через включенную червячную передачу.

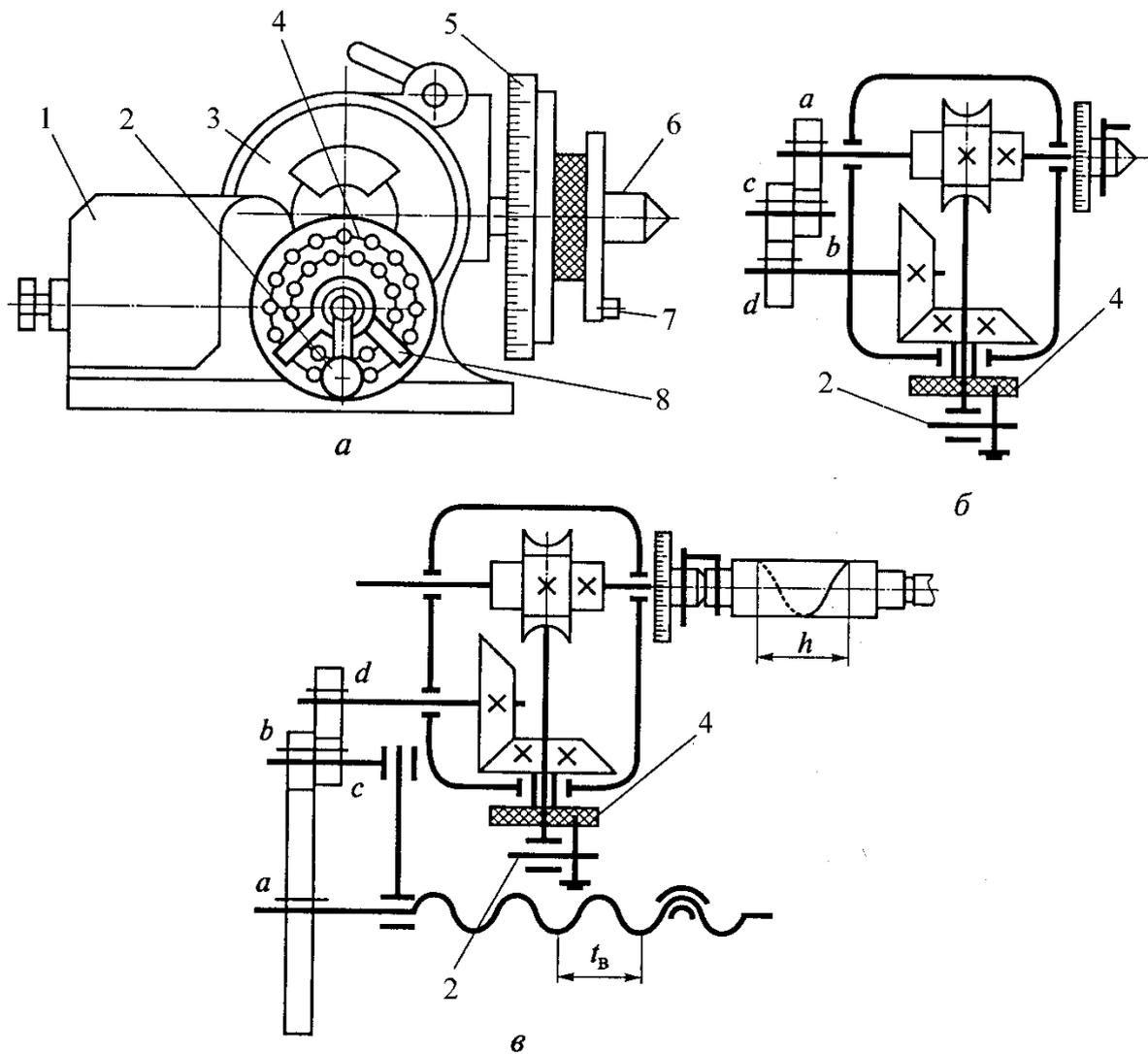


Рис. 10.50. Универсальная механическая делительная головка: *а* – компоновка головки; *б* – дифференциальное деление; *в* – настройка головки для фрезерования винтовых поверхностей; 1 – корпус; 2 – рукоятка; 3 – поворотный барабан; 4 – делительный диск; 5 – лимб; 6 – шпиндель с центром; 7 – поводок; 8 – раздвижной сектор; *а, б, с, д* – сменные колеса; *h* – шаг нарезаемой винтовой канавки; t_B – шаг ходового винта

Частота вращения n рукоятки, необходимая для поворота заготовки на N/z часть оборота,

$$n = N/z = 40/z = A + a/b = A + ma/(mb),$$

где N – характеристика делительной головки, величина, обратная передаточному отношению червячной пары, $N = 40$; z – число частей, на которое нужно разделить заготовку; A – целое число необходимых оборотов рукоятки; ma – число отверстий, на которое необходимо дополнительно повернуть рукоятку (для удобства отсчета ma ножки раздвижного сектора раздвигают на эту величину); mb – число отверстий на одном из концентрических рядов делительного диска.

10.7.8. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на фрезерных станках

Технологичные и нетехнологичные конструкции представлены на [рис. 10.51](#).

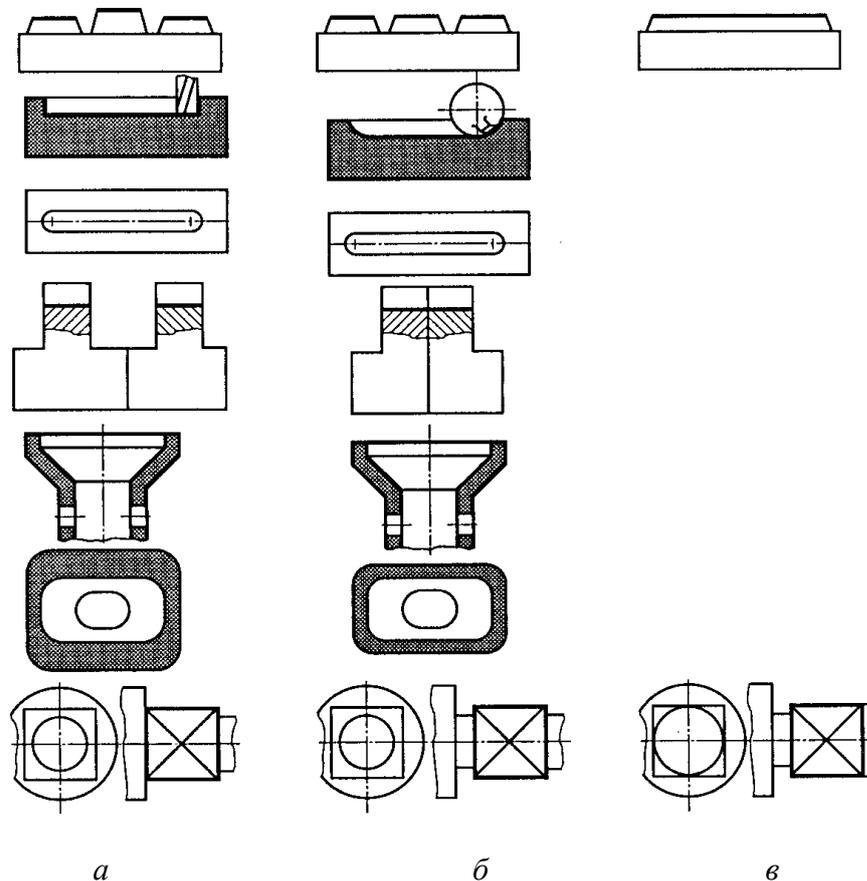


Рис. 10.51. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на станках фрезерной группы: *а* – нетехнологичные конструкции; *б* – технологичные конструкции; *в* – наиболее технологичные решения

Фрезеруемые поверхности, лежащие в одной плоскости, должны располагаться на одной высоте, что позволяет обрабатывать их одной фрезой за один проход. При размещении поверхностей на разных уровнях их придется фрезеровать в несколько проходов, опуская или поднимая стол станка. При наличии нескольких рядом расположенных бобышек желательно объединить их в одну плоскость, что позволит уменьшить вибрации в технологической системе СПИД.

Пазы и прорези целесообразно обрабатывать дисковыми фрезами, так как обработка ими производительнее, чем концевыми. Радиус паза необходимо выбирать равным радиусу стандартной фрезы. Для повышения производительности обработки желательно фрезеровать несколько одинаковых заготовок одновременно, поэтому вариант заготовок с односторонним выступом предпочтительнее варианта заготовок с двухсторонними

выступами. Разрезные втулки желательно выполнять с плоскостями разъема, не проходящими через центр отверстия. Ширина прорези должна быть равна ширине стандартной фрезы. Необходимо предусматривать равномерную ширину фрезерования по всей длине обрабатываемой поверхности. Неравномерная ширина повлечет неравномерность сил резания, что скажется на размерной точности обработки и приведет к увеличению волнистости обработанной поверхности. При фрезеровании квадратов необходимо предусматривать канавку на выход фрезы. При отсутствии канавки возможно фрезерование только концевой фрезой, что менее производительно и может привести к поломке фрезы. Диаметр прилегающей шейки вала должен быть меньше стороны квадрата. Наружные торцы корпусных деталей легче фрезеровать, чем внутренние.

10.8. Обработка заготовок на строгальных и долбежных станках

Строгание – лезвийная обработка резанием открытых поверхностей, имеющих прямолинейную или винтовую образующую; главное движение, прямолинейное возвратно-поступательное, придается инструменту в горизонтальной плоскости, движение подачи, поступательное дискретное, придается заготовке в направлении, перпендикулярном вектору главного движения. Разновидностью строгания является долбление на долбежных станках. При долблении главное движение придается режущему инструменту в вертикальной плоскости.

10.8.1. Характеристика методов строгания и долбления

Процесс резания при строгании или долблении прерывистый, и удаление материала происходит только при прямом (рабочем) ходе инструмента. При обратном (холостом) ходе резец не снимает стружку.

Прерывистый процесс резания определяет высокие динамические нагрузки на технологическую систему СПИД, ударное врезание инструмента в материал заготовки, поэтому при строгании применяют низкие скорости резания и массивные быстрорежущие инструменты. Наличие холостых ходов определяет низкую производительность обработки. Движение подачи при строгании и долблении прерывистое и осуществляется в конце холостого хода. При нормировании процесса задают скорости движения подачи: минутную S_m и на один двойной ход ползуна станка.

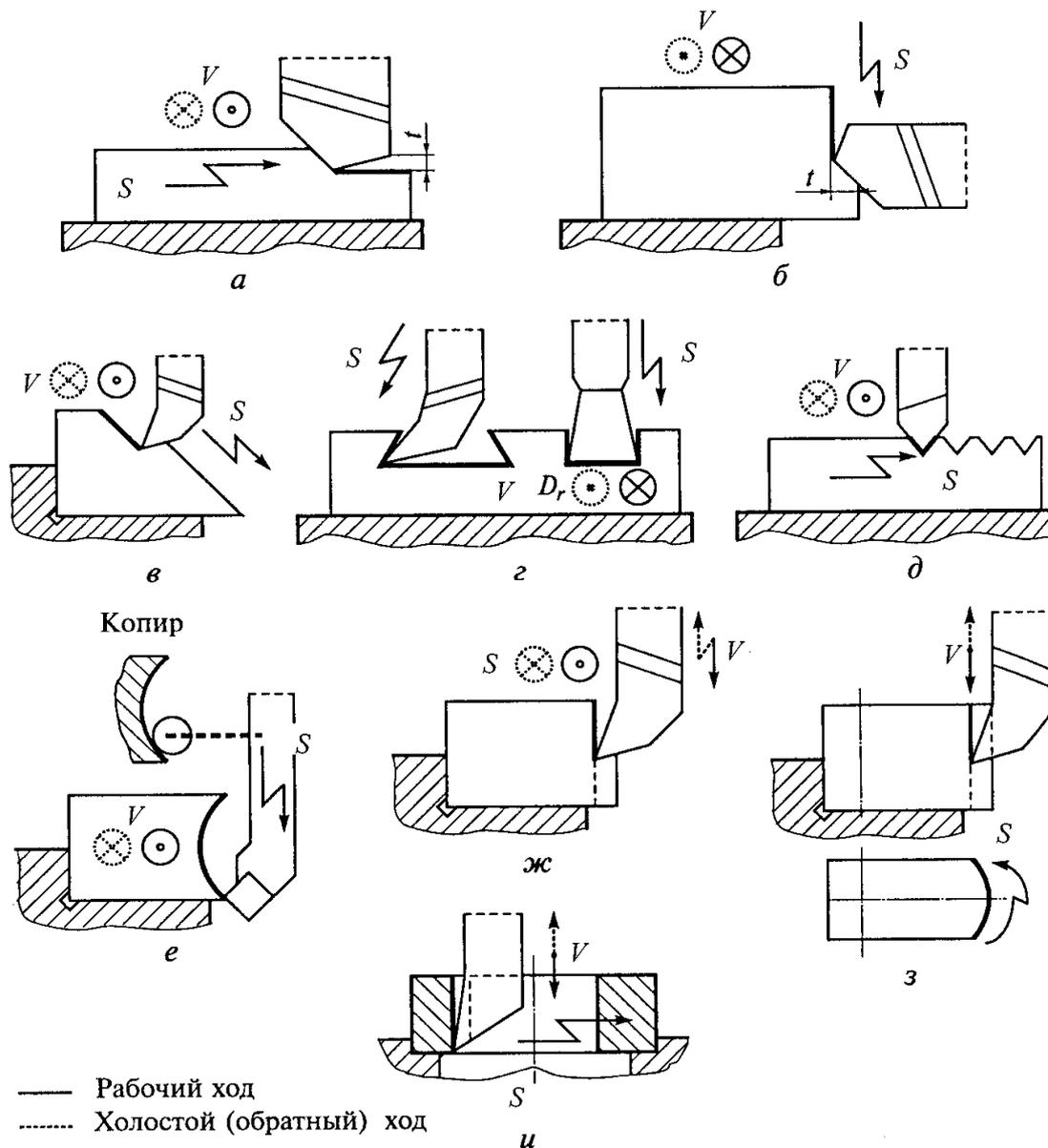


Рис. 10.52. Виды строгальных и долбежных работ: *a–в* – строгание плоских, горизонтальных и наклонных поверхностей; *г, д* – строгание пазов и рифлений; *е* – строгание фасонной поверхности по копиру; *ж* – долбление плоской поверхности; *з* – долбление фасонной поверхности с круговой подачей; *и* – долбление шпоночного паза; *V* – движение резания; *t* – глубина резания

На строгальных станках обрабатывают плоские (горизонтальные, вертикальные и наклонные) поверхности, уступы, пазы (призматические, Т-образные, V-образные, «ласточкин хвост» и т. п.), рифления, фасонные линейные поверхности (рис. 10.52, *a–e*).

На долбежных станках обрабатывают плоские вертикальные поверхности, шпоночные пазы, многогранники, некрупные отверстия, наружные пазы, фасонные поверхности (рис. 10.52, *ж–и*), в частности наружные и внутренние зубчатые венцы.

10.8.2. Строгальные и долбежные резцы и рабочие приспособления

При работе на строгальном станке на резец действует горизонтальная составляющая силы резания. Если на станок установить прямой резец (рис. 10.53, а), то под воздействием силы P он будет изгибаться по дуге радиуса r и врезаться в обработанную поверхность (заштрихованный участок), поэтому при строгании применяются изогнутые резцы (рис. 10.53, б). В данном случае резец, изгибаясь, отодвигается от обработанной поверхности, что приводит к увеличению получаемого размера, но это можно учесть при настройке станка.

Строгальные резцы, в зависимости от назначения, подразделяются на проходные, отрезные, фасонные и подрезные. Они выполняются правыми или левыми, черновыми или чистовыми.

Долбежные резцы обычно изготавливают четырех типов: проходные, прорезные, для шпоночных пазов и специальные (долбяки), с напаянной пластинкой из быстрорежущих сталей.

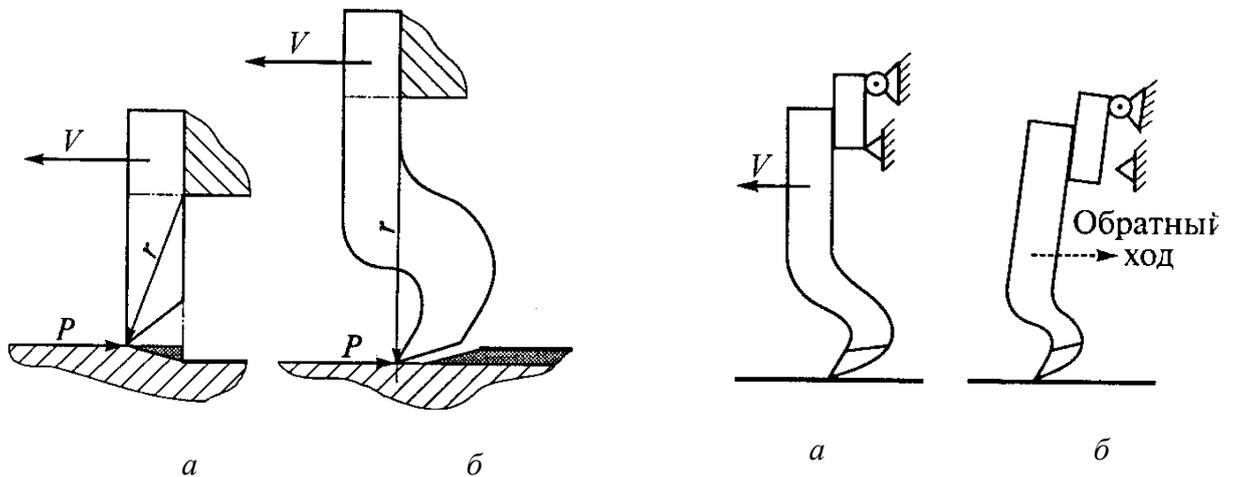


Рис. 10.53. Строгальный резец: а – изгиб токарного резца; б – изгиб строгального резца; V – движение резания; P – сила резания; r – радиус изгиба резца

Рис. 10.54. Установка строгального резца на качающейся плите: а – прямой ход; б – обратный ход

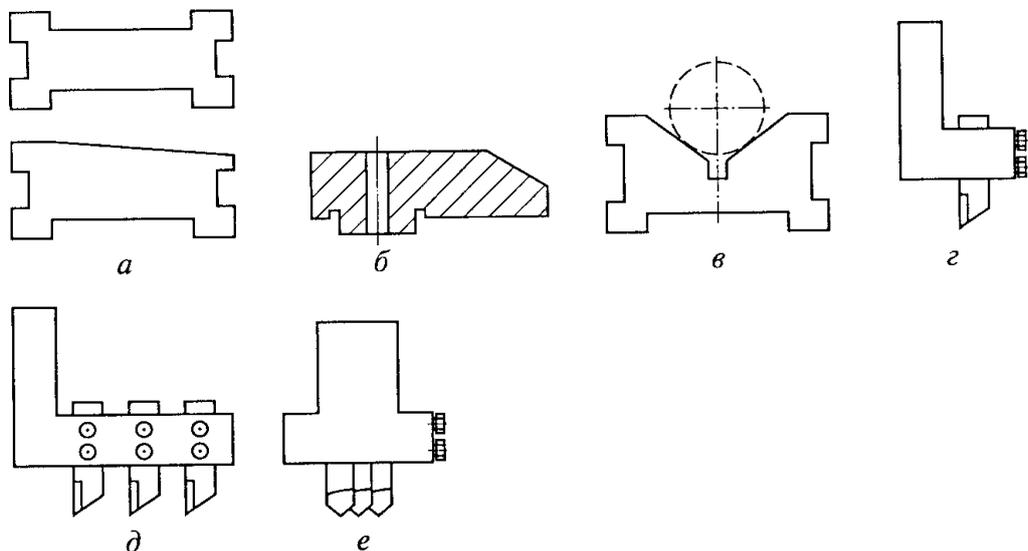


Рис. 10.55. Рабочие приспособления для строгальных и долбежных станков:
a – подкладки; *б* – прижим; *в* – призма; *г–е* – державки

При холостом ходе резца возможно касание задней поверхности инструмента об обработанную поверхность, поэтому резцедержатель устанавливают на поворотной плите ([рис. 10.54](#)) или в начале обратного хода резец отодвигают на 0,1–0,5 мм от обработанной поверхности (отскок).

Обрабатываемые заготовки небольших размеров и простых форм устанавливают на станке в тисках. Крупные заготовки и заготовки сложных форм устанавливаются непосредственно на столе, имеющем Т-образные пазы, и закрепляются прихватами, призматическими или клиновыми подкладками ([рис. 10.55, а](#)), прижимами ([рис. 10.55, б](#)). Заготовки с цилиндрическими базирующими элементами устанавливают на призмы ([рис. 10.55, в](#)).

Режущий инструмент закрепляется в резцедержателе, однопозиционных ([рис. 10.55, г](#)) или многопозиционных ([рис. 10.55, д, е](#)) державках. В державках, показанных на [рис. 10.55, д](#), инструмент устанавливается с превышением высоты последующего резца над предыдущим, что позволяет за один проход обработать заготовку на значительную глубину, т. е. использовать принцип деления припуска на части. Державки, показанные на [рис. 10.55, е](#), позволяют вести параллельную обработку заготовки.

10.8.3. Строгальные и долбежные станки

Поперечно-строгальные станки ([рис. 10.56, а](#)) применяются в единичном и серийном производстве и во вспомогательных цехах машиностроительных заводов для обработки заготовки с длиной обработки не более 1000 мм. На фундаментной плите *б* установлена станина *7*. По вертикальным направляющим станины перемещается траверса *5* с горизонтальными направляющими, на которых консольно установлен стол *1*. На столе размещаются заготовка или рабочие приспособления.

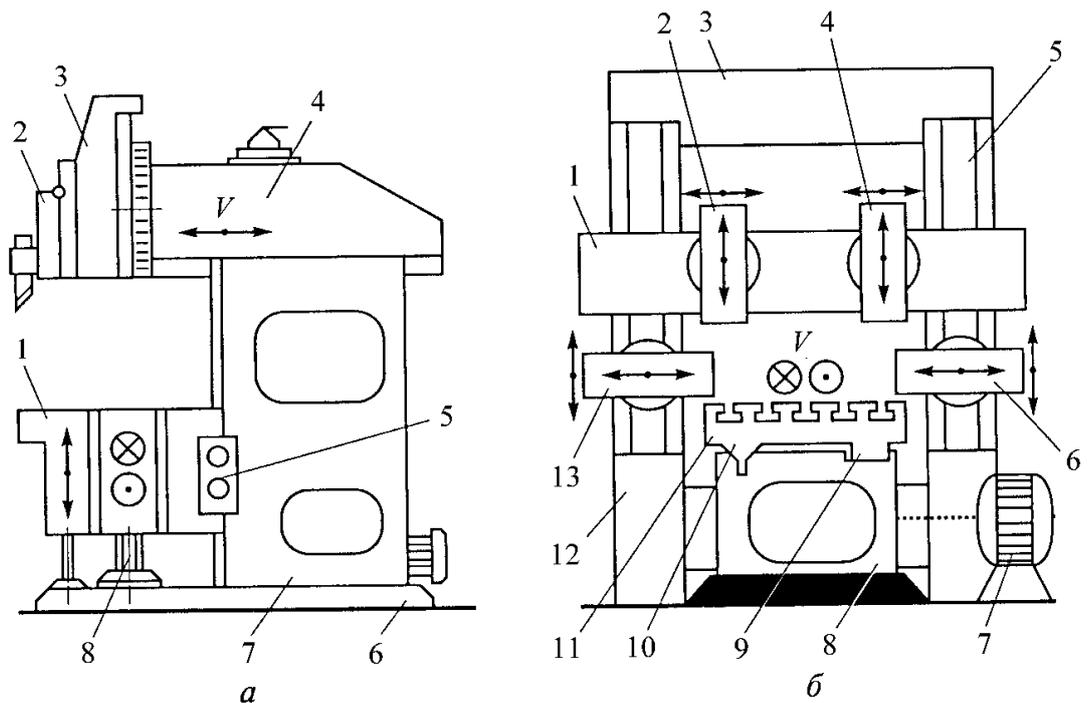


Рис. 10.56. Строгальные станки: *а* – поперечно-строгальный: 1 – стол; 2 – поворотная плита; 3 – суппорт; 4 – ползун; 5 – траверса; 6 – фундаментная плита; 7 – станина; 8 – домкрат; *б* – продольно-строгальный: 1 – траверса; 2, 4 – вертикальные суппорты; 3 – поперечина; 5, 12 – стойки; 6, 13 – боковые суппорты; 7 – главный электродвигатель; 8 – станина; 9, 10 – направляющие; 11 – стол; *V* – движение резания

Вертикальные перемещения стола осуществляются домкратом 8. На верхнем торце станины выполнены горизонтальные направляющие, по которым перемещается ползун 4. На переднем торце ползуна выполнены вертикальные направляющие, по которым перемещается вертикальный суппорт 3 с поворотной плитой 2 и резцедержателем. Вертикальный суппорт можно поворачивать вокруг горизонтальной оси для строгания наклонных плоскостей. На продольно-строгальных станках обрабатывают крупные, тяжелые заготовки. Ход стола у этих станков 1,5–12 м, ширина строгания 0,7–4 м.

Продольно-строгальные станки подразделяются на одно- и двухстоечные. Двухстоечный станок показан на [рис. 10.56, б](#). На верхней части станины 8 расположены направляющие (правая 9 – плоская, левая 10 – *V*-образная). По направляющим перемещается стол 11, на котором устанавливают заготовки. Стол приводится в движение от собственного электродвигателя постоянного тока 7, что позволяет бесступенчато регулировать скорости прямого и обратного ходов. Портал станка состоит из правой 5 и левой 12 стоек, соединенных сверху поперечиной 3. По вертикальным направляющим стоек перемещается траверса 1 и каретки боковых суппортов: правого 6 и левого 13. На траверсе размещены левый 2 и правый 4 вертикальные суппорты. Все суппорты снабжены собственными коробками подач, могут перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях и быть повернуты в вертикальной плоскости на угол до 60°.

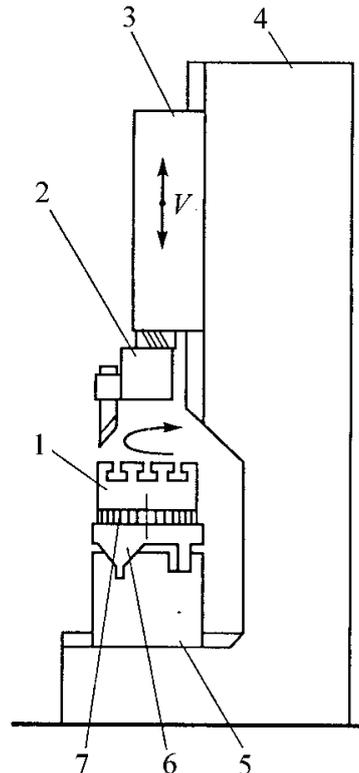


Рис. 10.57. Долбежный станок: 1 – стол; 2 – суппорт; 3 – ползун; 4 – станина; 5 – поперечные салазки; 6 – продольные салазки; 7 – поворотные салазки; V – движение резания

Долбежные станки ([рис. 10.57](#)) характеризуются тем, что главное движение резания осуществляется в вертикальной плоскости.

На горизонтальных направляющих станины 4 установлены поперечные 5, продольные 6 и поворотные 7 салазки с рабочим столом 1. По вертикальным направляющим станины перемещается ползун 3 с суппортом 2 и резцедержателем.

10.8.4. Технологические требования к деталям, обрабатываемым на строгальных и долбежных станках

При конструировании деталей, обрабатываемых на строгальных и долбежных станках, необходимо учитывать следующие требования.

Обрабатываемые поверхности заготовки целесообразно оформлять в виде плоскостей или их сочетаний. Желательно избегать сложных фасонных поверхностей, требующих изготовления специальных копиров. Обрабатываемые поверхности следует располагать в одной плоскости, что позволит обрабатывать их за один проход. Перед обработкой поверхности необходимо прострогать фаски со стороны входа и выхода инструмента – это обеспечит более плавное врезание резца в заготовку и предотвратит скалывание края обработанной поверхности при выходе резца ([рис. 10.58, а](#)).

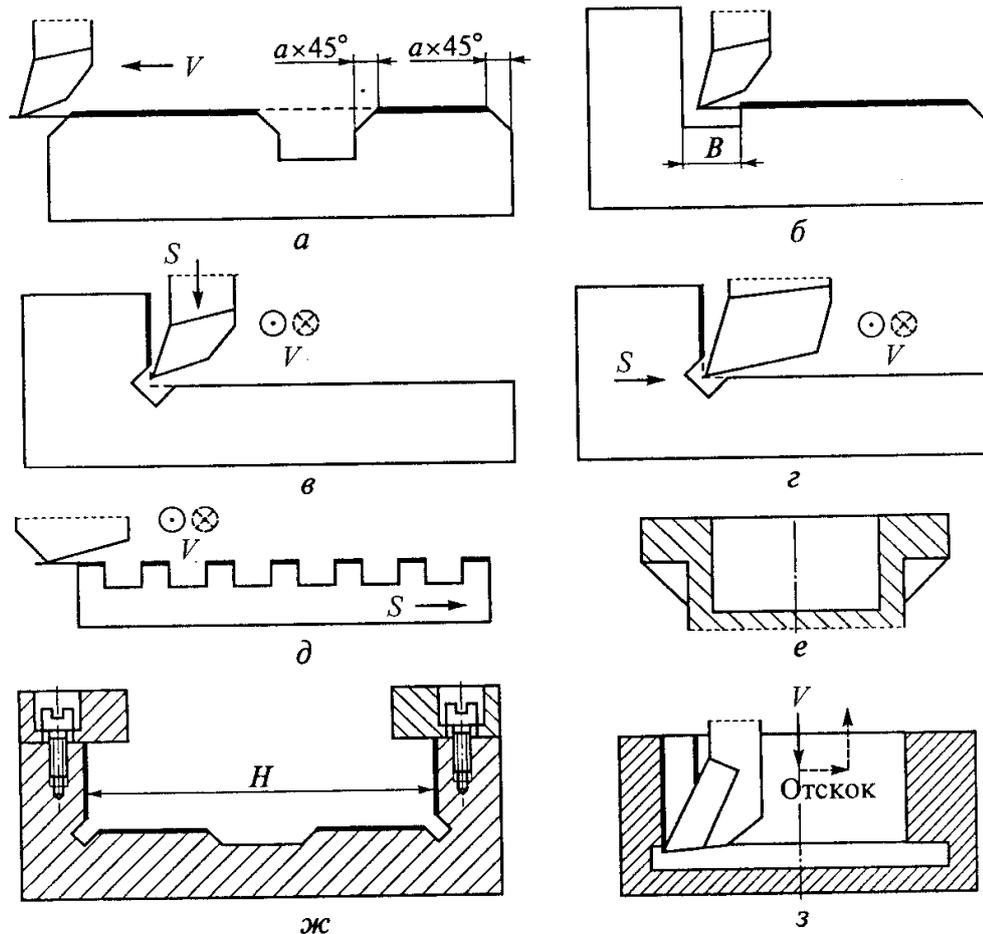


Рис. 10.58. Технологические требования к деталям, обрабатываемым строганием и долблением: *a* – прерывистых поверхностей; *б–г* – горизонтальных и вертикальных поверхностей с уступами; *д* – ребристых поверхностей; *е* – коробчатых нежестких заготовок; *ж* – пазов; *з* – несквозных шпоночных пазов; *V* – движение резания; *а* – фаска; *B* – ширина канавки для выхода инструмента; *S* – движение подачи; *H* – ширина паза

Обрабатываемые поверхности должны обеспечить свободный выход резца в конце рабочего хода. При наличии в направлении главного движения уступов необходимо предусматривать разделительную канавку для выхода инструмента (рис. 10.58, б). Для поперечно-строгальных станков ширина канавки $B = 10\text{--}15$ мм, для продольно-строгальных станков $B = 30\text{--}40$ мм. При строгании поверхностей, расположенных под углом друг к другу, необходимо предусматривать разделительную канавку (рис. 10.58, в, г) для выхода инструмента и дальнейшей правильной сборки сопрягаемых деталей в узле.

Строгание узких длинных поверхностей необходимо проводить в продольном направлении, так как строгание в поперечном направлении с большим числом двойных ходов в минуту приведет к значительным вибрациям технологической системы СПИД. Нецелесообразно строгать ребристые, прерывистые поверхности, поскольку это вызывает значительные вибрации технологической системы СПИД. При необходимости обработки таких

поверхностей их строгают по длине ребра (рис. 10.58, *д*). При строгании деталей малой жесткости (например, коробчатые конструкции с тонкими стенками) необходимо для повышения их прочности предусматривать ребра жесткости (рис. 10.58, *е*). Следует избегать строгания поверхностей, расположенных в углублениях. Пазы, обрабатываемые строганием на проход, должны быть открытыми. Ширина обрабатываемого паза H (рис. 10.58, *ж*) должна обеспечивать размещение строгального резца. Пазы лучше выполнять сборными. Желательно, чтобы шпоночные пазы, обрабатываемые долблением, были открытыми. При долблении несквозных шпоночных пазов необходимо предусматривать кольцевые канавки для выхода инструмента (рис. 10.58, *з*). Нецелесообразно обрабатывать долблением длинные поверхности, так как для этого потребуются резцы с большим вылетом, что приведет к значительным деформациям и разрушению резца.

10.9. Резьбо- и зубонарезание

10.9.1. Резьбонарезание

Нарезание резьбы – одна из распространенных операций в машиностроении. Наружные и внутренние резьбы наиболее просто выполнять на токарно-винторезном станке фасонными (резбовыми) резцами. В крупносерийном производстве применяются специальные болторезные станки и нарезные головки, часто применяют накатку резьб роликами. Точные и мелкие резьбы нарезают профильными шлифовальными кругами. Резьбы с большим шагом нарезают резьбофрезерованием. Часто наружные резьбы нарезают плашками, а внутренние – метчиками.

Резьбонарезной инструмент – сложный фасонный инструмент с острыми углами, требующий тщательной химико-термической обработки и доводки рабочих поверхностей.

Нарезание резьбы резцами. Резец профиля, соответствующего профилю нарезаемой резьбы, устанавливается в резцедержателе в основной плоскости перпендикулярно оси центров станка (рис. 10.59, *а*) по шаблону.

Установка резца выше или ниже линии центров приведет к искажению профиля нарезаемой резьбы. Скорость движения продольной подачи должна быть равна шагу резьбы. Для нарезания наружной резьбы применяют прямой фасонный резец (см. рис. 10.11, *и*), для нарезания внутренней резьбы применяют фасонный расточный резец (см. рис. 10.11, *е*). В серийном производстве часто применяют круглый фасонный резец (рис. 10.59, *б*), позволяющий производить большое число переточек. Нарезание резьбы производится за несколько рабочих ходов, причем последовательность съема стружки может быть различной. Чаще всего резец устанавливают перпендикулярно оси центров станка, и оба его лезвия режут одновременно, снимая симметричные стружки. Для уменьшения числа черновых ходов резец

устанавливают под углом 60° к оси центров (за счет поворота верхних, поворотных салазок). В этом случае работает только одно лезвие, можно снимать более толстые стружки.

В целях повышения производительности нарезания наружных резьб применяют охватывающие резцовые головки (рис. 10.59, в) – *вихревое резание*. Для этого на салазках станка устанавливается электродвигатель с приводом к четырехрезцовой головке 3. Центр вращения головки 1 не совпадает с центром 4 заготовки 2. Заготовка устанавливается в центрах станка. Движение резания придается головке (200–300 м/мин). Центр головки вращается вокруг центра заготовки; резцы, выполненные из твердого сплава, срезают серповидную стружку.

Нарезание резьбы плашками. Плашка (рис. 10.59, г) – размерный многолезвийный инструмент, предназначенный для нарезания наружной резьбы, – представляет собой гайку, в которой с помощью отверстий 2 образованы режущие зубья 3. Корпус 1 плашки снабжен элементами для ее базирования и закрепления в патроне станка или в воротке. В сущности, плашка представляет собой протяжку с режущими зубьями, расположенными по винтовой поверхности. Рабочая часть плашки имеет режущий 4 и калибрующий 5 участки. Для увеличения стойкости плашки и улучшения точности обработки рекомендуется очищать впадину между зубьями, для чего после полного оборота плашки вокруг оси заготовки необходимо произвести обратный поворот на 120° . Скорость резания выбирается в зависимости от материала заготовки, шага и диаметра нарезаемой резьбы. При обработке низколегированных сталей скорость резания принимается 2,3–9,2 м/мин, при обработке алюминиевых сплавов и латуни – 30–40 м/мин.

Нарезание резьбы метчиками. Метчик предназначен для нарезания внутренних резьб и представляет собой винт, снабженный одной или несколькими продольными канавками, образующими режущие кромки и передние поверхности на его зубьях. Основными конструктивными элементами метчика (рис. 10.60) являются: заборный (режущий) участок 1, калибрующий участок 2, хвостовик 3 с квадратом 4. В сущности, метчик, как и плашка, представляет собой протяжку с режущими зубьями, расположенными по винтовой поверхности.

Ручные метчики выпускаются в комплекте (черновой и чистовой). Серийно выпускаются метчики М1 – М27 с метрической резьбой и с трубной резьбой.

Гаечные метчики выполнены с более длинной заборной частью, что позволяет нарезать полный профиль резьбы одним метчиком. Гаечные метчики имеют удлиненный (прямой или изогнутый) хвостовик. Серийно выпускаются метчики М3 – М30 с метрической резьбой.

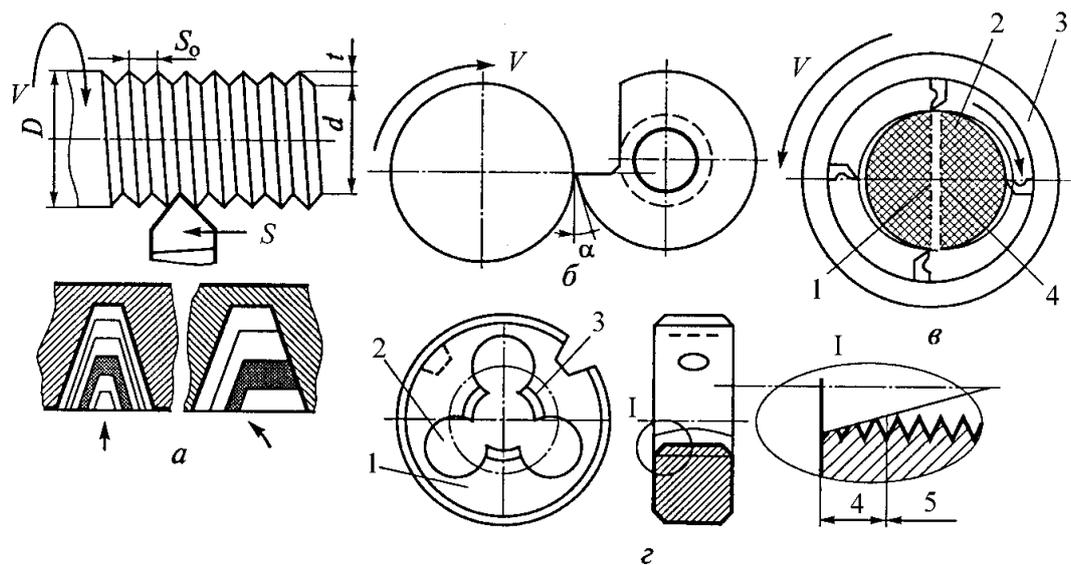


Рис. 10.59. Нарезание наружной резьбы: *a* – призматическим резцом; *б* – круглым резцом; *в* – резцовая головка: 1 – центр вращения головки; 2 – заготовка; 3 – резцовая головка; 4 – центр вращения заготовки; *z* – плашка: 1 – корпус; 2 – отверстия; 3 – режущие зубья; 4 – режущий участок; 5 – калибрующий участок; *V* – главное движение; *S* – движение подачи; *S₀* – подача на оборот; *D*, *d* – диаметры резьбы; *t* – полная глубина резания; α – главный задний угол

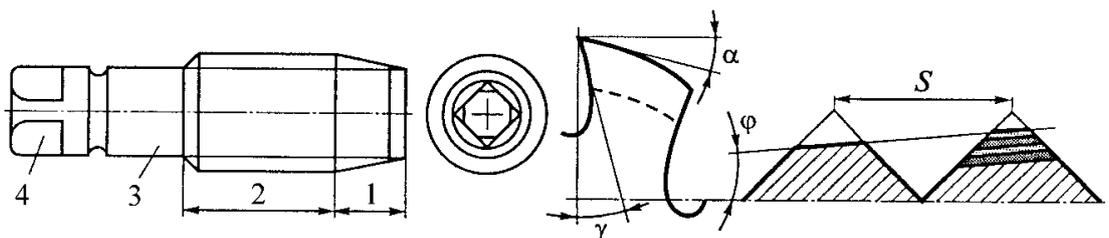


Рис. 10.60. Метчик: 1 – заборный участок; 2 – калибрующий участок; 3 – хвостовик; 4 – квадрат; *S* – шаг винтовой канавки

Машиноручные метчики охватывают весь диапазон метрических и трубных резьб. Выпускаются метчики как с правой, так и с левой резьбой, одинарные или комплектные (две или три штуки в комплекте). Изготавливаются метчики из быстрорежущих сталей.

10.9.2. Зубонарезание

Обработка заготовок зубчатых колес на зуборезных станках. По своей кинематике нарезание зубчатого венца является наиболее сложной операцией, так как в процессе резания необходимо удалить большой объем металла из впадины между зубьями. Зубчатый венец имеет сложную геометрию и высокие сложные нормы точности (нормы кинематической точности, плавности работы, бокового зазора, контакта зубьев – всего 24 показателя).

Различают два метода формирования эвольвентного профиля зубьев: копированием и обкаткой. При обработке копированием профиль зуба

инструмента должен соответствовать профилю впадины между зубьями нарезаемого венца. Венцы нарезают модульными дисковыми или пальцевыми фрезами, круговыми протяжками. При обработке обкаткой имитируют зацепление зубчатой пары, причем одним из элементов пары является режущий инструмент, другим – обрабатываемое зубчатое колесо. Поэтому профиль зуба инструмента должен соответствовать профилю зуба пары имитируемого зацепления. Для имитации зацепления зубчатой пары режущему инструменту и/или заготовке, помимо основных движений резания и подачи, необходимо придавать дополнительные (обкатные) движения. Метод обката обеспечивает непрерывное формообразование зубчатого венца и имеет высокую производительность обработки. Применение жестких, точных станков обеспечивает высокую точность зубонарезания. По методу обката зубчатые колеса нарезают червячными фрезами, долбяками, резцовыми головками, шевингованием.

Обработка заготовок зубчатых колес модульными фрезами. Метод основан на профилировании зубьев фасонным инструментом – модульной дисковой или пальцевой фрезой. Нарезание колес внешнего зацепления дисковой фрезой производится на горизонтальных или универсально-фрезерных станках (рис. 10.61, а).

Заготовка 1 устанавливается в центрах 2 и 4 универсальной делительной головки. В процессе фрезерования впадины между зубьями колеса фрезе 3 сообщают вращательное движение резания V , заготовке – движение продольной подачи S . После прорезания одной впадины заготовка поворачивается на угол, равный шагу между зубьями, $1/z$ – делительный поворот.

Нарезание колес внешнего зацепления пальцевой фрезой производится на вертикально-фрезерных станках, колес внутреннего зацепления – на горизонтально- или универсально-фрезерных станках, но фреза устанавливается на шпинделе специальной накладной головки 5 (рис. 10.61, б). Теоретически для каждого модуля и числа зубьев требуется отдельная модульная фреза. На практике ограничиваются комплектом модульных фрез, каждая из которых может быть использована для нарезания колес данного модуля в определенном интервале зубьев. В комплект входят 8 или 15 фрез.

Профиль зуба нарезаемого венца зависит от модуля, числа зубьев модульных фрез и коэффициентов коррекции. Применение усредненного (по числу зубьев) профиля фрезы приводит к большой погрешности нарезаемого профиля.

Метод малопроизводителен, поэтому используется при нарезании зубчатых венцов в ремонтных мастерских, в единичном производстве или при нарезании крупномодульных колес.

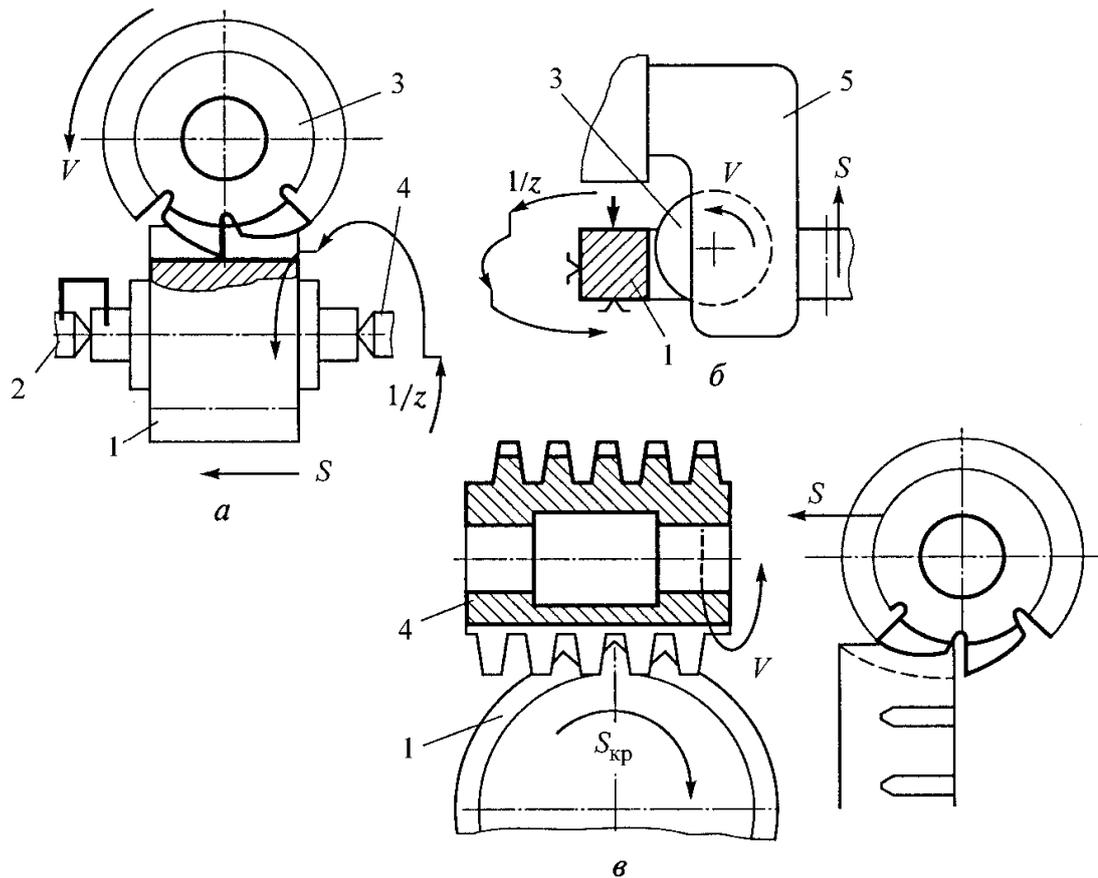


Рис. 10.61. Зубофрезерование: *а* – наружного венца методом копирования; *б* – внутреннего венца методом копирования; *в* – наружного венца методом обката; 1 – заготовка; 2, 4 – центры; 3 – червячная фреза; 5 – накладная головка; $1/z$ – делительный поворот

Обработка заготовок зубчатых колес круговыми протяжками. Метод основан на профилировании зубьев фасонным инструментом – круговой протяжкой (см. [рис. 10.32](#)). При нарезании цилиндрических прямозубых колес используют протяжку с подвижным элементом (ползун, качалка). При нарезании цилиндрических косозубых колес используют протяжку без подвижного элемента, но для обеспечения прямолинейности зуба чистовое резание производят при прямолинейном дополнительном движении протяжки вдоль образующей зуба (см. [рис. 10.36, в](#)).

Метод высокопроизводителен, обеспечивает высокую точность нарезаемого венца 7-й, 8-й степеней и используется в крупносерийном производстве при нарезании зубчатого венца вала-сошки руля, при нарезании цилиндрических и конических колес в тракторо- и автомобилестроении.

Обработка заготовок зубчатых колес червячными фрезами. Метод основан на имитации зацепления «рейка – колесо» ([рис. 10.61, в](#)). Червячная фреза 3 представляет собой винт с прорезанными перпендикулярно виткам канавками. В результате образуются режущие зубья, расположенные по винтовой линии. Профиль режущей части фрезы в ее осевом сечении близок к профилю рейки. Для кинематического обеспечения имитации реечного

зацепления заготовке I придается обкатное движение, а имитация осевого перемещения рейки обеспечивается за счет вращения фрезы и расположения режущих зубьев по винтовой линии.

Червячные фрезы изготавливают однозаходными и многозаходными. Чем больше число заходов фрезы, тем выше производительность, но ниже точность обработки. При встречном фрезеровании подачу фрезы осуществляют сверху вниз. Фреза вначале срезает тонкую стружку, затем постепенно увеличивает ее толщину к выходу зуба фрезы из заготовки. Применяется для чернового фрезерования. Попутное фрезерование ведется при обратном ходе фрезы снизу вверх. При этом можно увеличить скорость резания на 20–30 %, шероховатость обработанной поверхности снижается на 10–20 %, равномерно нагружаются все зубья фрезы – *чистовое фрезерование*. Нарезание зубчатых венцов червячными фрезами позволяет получить колеса 8-й, 9-й степеней точности.

Обработка заготовок зубчатых колес долблением. Метод основан на имитации зацепления «шестерня – колесо». Долбляк представляет собой зубчатое колесо, зубья которого имеют эвольвентный профиль. Для кинематического обеспечения имитации реечного зацепления и заготовке и долбяку придается обкатное движение встречного направления. Для того чтобы исключить трение задних поверхностей зуба долбяка об обработанную поверхность, при обратном ходе долбяк отводят от заготовки на 0,1–0,2 мм (отскок).

Зубодолбление – наиболее универсальный метод нарезания цилиндрических колес. Он позволяет нарезать прямо- и косозубые колеса, колеса внешнего и внутреннего зацепления, колеса с буртиками, многовенцовые и шевронные колеса. Точность обработки 7-й, 9-й степеней. Однако по производительности зубодолбление уступает зубофрезерованию червячными фрезами.

Обработка зубчатых колес шевингованием. Метод основан на имитации зацепления «шестерня – колесо» на скрещивающихся осях. Шейвер представляет собой зубчатое колесо (угол наклона зубьев 5 или 15°), изготовленное из быстрорежущей стали, с канавками вдоль профиля зубьев (рис. 10.62, а). Главная 1 и вспомогательная 2 режущие кромки образуют угол резания $\delta = 90^\circ$, поэтому зуб шейвера скоблит металл заготовки (бреющее резание, или шевингование), снимая тонкие (игольчатые) стружки. Двухстороннее шевингование производят при плотном зацеплении шейвера с заготовкой. Один из элементов этой пары ведущий: он получает вращение от вала электродвигателя и передает его ведомому элементу. Оси шейвера и заготовки скрещиваются под углом 5–20°.

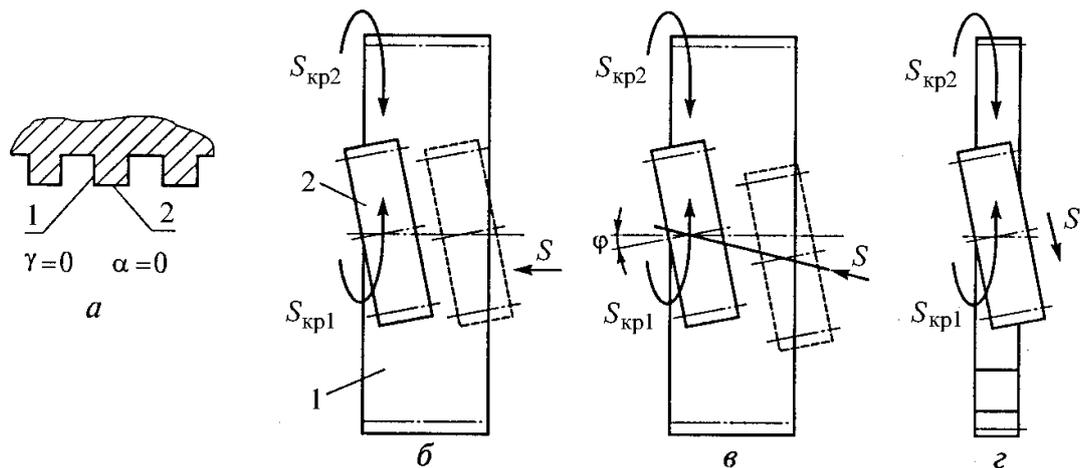


Рис. 10.62. Зубошевингование: *a* – зуб шевера: 1 – главная режущая кромка; 2 – вспомогательная режущая кромка; *б* – шевингование с продольной подачей: 1 – заготовка; 2 – шевер; *в* – шевингование с диагональной подачей; *г* – шевингование с поперечной подачей

Назначение шевингования – повышение точности колеса, снижение шума в передаче и шероховатости поверхности зубьев. При шевинговании уменьшаются погрешности профиля, шага зацепления, циклическая погрешность (волнистость), колебание межцентрового расстояния на оборот колеса, улучшается пятно контакта по высоте зуба (по этим показателям обеспечиваются 5-я, 6-я степени точности).

Конические колеса с круговыми зубьями нарезают по методу обката резцовыми головками. Нарезаемое колесо 5 (рис. 10.63) в процессе обработки находится в зацеплении с плоским коническим колесом 1 (производящее колесо) с круговыми зубьями (круговая рейка). Роль зубьев производящего колеса выполняют резцы 4 резцовой головки 2, вращающейся вокруг оси 3 производящего колеса (обкатное движение $S_{\text{круг}2}$). При повороте заготовки на один зуб резцовая головка, размещенная на вращающейся люльке станка, синхронно поворачивается на угол, соответствующий одному зубу. Люлька вращается до тех пор, пока не будет закончена обкатка профиля одной впадины. После этого заготовка отводится от резцовой головки, люлька начинает вращение в обратную сторону, а заготовка продолжает свое вращение в том же направлении. Когда люлька займет исходное положение, заготовка должна будет находиться в угловом положении, соответствующем следующей впадине. Заготовка подводится к резцовой головке, и цикл резания повторяется.

Конические колеса с прямым зубом нарезаются фрезерованием двумя спаренными дисковыми фрезами с прямолинейными кромками, строганием одним резцом с прямолинейными кромками при непрерывном делении заготовки, строганием по копиру одним или двумя резцами и круговым протягиванием. Конические колеса с круговым зубом нарезаются фрезерованием конической фрезой, круговым протягиванием торцевой резцовой головкой, врезанием резцовой головкой.

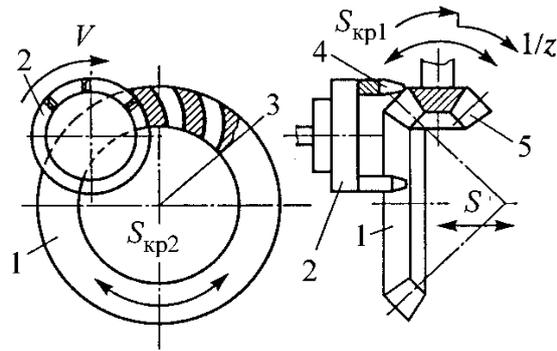


Рис. 10.63. Схема работы круговой резцовой головки: 1 – производящее колесо; 2 – резцовая головка; 3 – ось производящего колеса; 4 – резцы; 5 – нарезаемое колесо

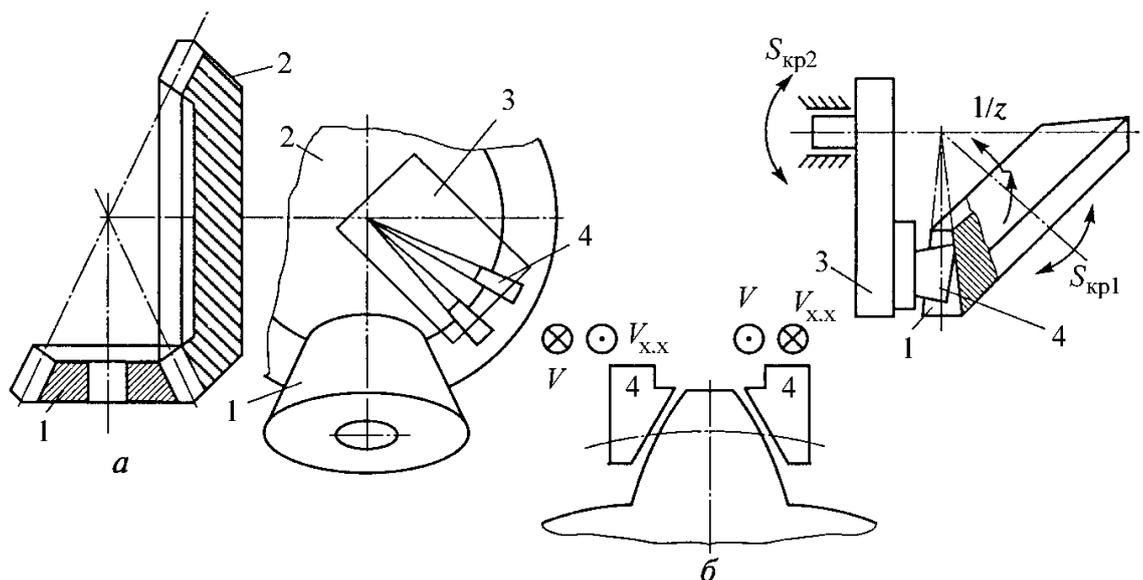


Рис. 10.64. Зубострогание: а – имитируемое зацепление; б – схема процесса; 1 – нарезаемое колесо; 2 – производящее колесо; 3 – люлька; 4 – строгальные резцы

Нарезание конических зубчатых колес. При нарезании конических зубчатых колес применяются методы копирования, обката и обработка по копиру. При обработке методом обката кинематика станка имитирует зацепление конической пары «производящее колесо (связанное с режущим инструментом) – нарезаемое колесо».

В основу зубострогания методом обката положено зацепление двух конических зубчатых колес (рис. 10.64, а), одно из которых плоское. Нарезаемое коническое колесо 1 находится в зацеплении с производящим плоским коническим колесом 2, зубья которого имеют форму рейки (кольцевая рейка). Роль производящего колеса имитируют два строгальных резца 4 (рис. 10.64, б), образующих впадину между зубьями. Строгальные резцы перемещаются по направляющим люльки 3, вращающейся вокруг оси производящего колеса. Резцы попеременно совершают возвратно-поступательные движения в направлении к вершине конусов производящего колеса и заготовки. Для кинематического обеспечения имитации зубчатого зацепления

заготовке придается возвратно-качательное движение. В результате главного и обкатного движений на заготовке образуются две неполные впадины и один полностью обработанный зуб. После нарезания одного зуба заготовка отводится от резцов. Направления вращения люльки с резцами и заготовки изменяются, затем они возвращаются в исходное положение (холостой ход). Во время отвода заготовки от резцов шпиндель бабки изделия поворачивается вместе с заготовкой на угол, равный шагу между зубьями. Цикл нарезания повторяется. Способ позволяет нарезать прямые зубья и используется в мелкосерийном и серийном производстве.

10.9.3. Технологические требования к конструкции зубчатых колес

Примеры технологичных и нетехнологичных конструкций зубчатых колес представлены на [рис. 10.65](#).

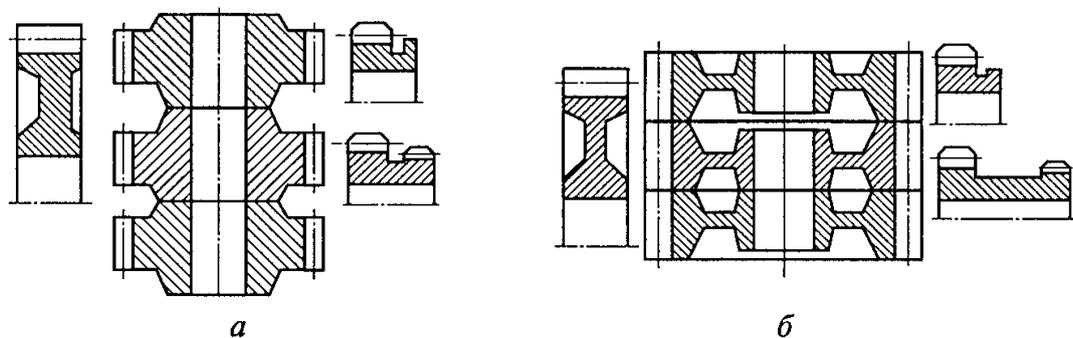


Рис. 10.65. Технологические требования к конструкции зубчатых колес: *а* – нетехнологичные конструкции; *б* – технологичные конструкции

Несимметричное расположение элементов зубчатого колеса и резкие переходы диаметров приводят к повышенным деформациям зуба при термической обработке. Термическая обработка колес с симметричными элементами значительно уменьшает деформацию зубьев. Нарезание колес с выступающими ступицами в пакете приводит к увеличению рабочего хода инструмента. Колеса без выступающих ступиц можно обрабатывать пакетом. Зубчатые колеса с близко расположенным высоким буртиком можно обрабатывать только зубодолблением. Если буртик расположить ниже окружности впадин зубчатого венца, его можно обрабатывать червячными фрезами и круговыми протяжками. Многовенцовые зубчатые колеса с близко расположенными венцами затруднительно обрабатывать современными высокопроизводительными методами. Лучше расположить венцы на расстоянии, достаточном для выхода червячной фрезы или круговой протяжки, или спроектировать сборное колесо.

10.10. Обработка заготовок шлифованием

Шлифование – процесс обработки заготовок резанием абразивным инструментом (кругами, брусками, абразивным инструментом на гибкой основе, свободным абразивом). Абразивные зерна расположены в кругах беспорядочно и удерживаются связующим материалом. При вращении круга в зоне его контакта с обрабатываемой поверхностью часть зерен срезает материал заготовки. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микроследов воздействия абразивных зерен, поэтому иногда шлифование определяют как управляемое изнашивание заготовки. Скорость резания при шлифовании – 30–100 м/с. Шлифованием можно производить чистовую обработку заготовок из различных материалов, имеющих разную твердость (для заготовок из закаленных сталей это основной способ обработки).

10.10.1. Особенности процесса резания при шлифовании

Абразивный инструмент, в отличие от лезвийного инструмента, имеет множество режущих микролезвий, расположенных хаотично. Единичное зерно шлифовального круга может располагаться на некотором расстоянии от обрабатываемой поверхности, скользить по обработанной поверхности (скользящие зерна), проникать в обработанную поверхность на небольшую глубину и деформировать материал заготовки только пластически (деформирующие зерна), проникать в обработанную поверхность на глубину, достаточную для снятия стружки (режущие зерна). По сравнению с лезвийной обработкой шлифование характеризуется повышенным сопротивлением резанию, поскольку скользящие зерна создают дополнительное трение, деформирующие зерна – дополнительные упругую и пластическую деформации, а у режущих зубьев углы резания неоптимальные. Кроме того, сила резания на единичном зерне больше, но, так как снимаются микростружки, суммарная сила резания невелика. За счет дополнительного трения и деформаций температура в зоне резания значительно выше, чем при лезвийной обработке, поэтому возможны структурные превращения металла в зоне резания (прижоги). Стружка сгорает на воздухе в виде снопа искр, что требует дополнительных мер пожарной и санитарной безопасности.

10.10.2. Износ, стойкость и правка кругов

В процессе шлифования режущие свойства круга изменяются. Абразивные зерна затупляются, частично раскалываются, выкрашиваются; поры между зернами забиваются отходами шлифования (круг «засаливается»); поверхность круга теряет свою первоначальную форму. Как следствие, возрастают сила и температура резания; точность обработки снижается, увеличивается вероятность прижогов. Однако при выламывании

затупившихся зерен на поверхности круга обнажаются новые, незатупившиеся зерна, т. е. круг частично самозатачивается. В этом смысле очень важна роль связки (вещества, закрепляющего зерна) и «твердости» круга. При слабом закреплении зерен они быстрее выламываются, круг лучше самозатачивается, но рабочая поверхность круга быстро теряет свою форму, что удобно при черновом шлифовании. При чрезмерном закреплении зерен круг быстро теряет свои режущие свойства, но рабочая поверхность хорошо сохраняется, что удобно при чистовом шлифовании.

Для восстановления геометрии круга и его режущих свойств проводят правку круга. Алмазным или абразивным инструментом снимают часть рабочей поверхности круга. Толщина удаляемого слоя обычно не превышает 0,01–0,03 мм.

Геометрическая стойкость шлифовального круга – время (количество обработанных заготовок) непрерывной работы, после которой необходима правка с целью восстановления геометрических параметров рабочей поверхности. Геометрическую стойкость обычно назначают для чистового шлифования, для шлифования фасонных или конических поверхностей.

Физическая стойкость шлифовального круга – время (количество обработанных заготовок) непрерывной работы, после которой необходима правка с целью восстановления режущих свойств рабочей поверхности. Физическую стойкость обычно назначают для черного шлифования.

10.10.3. Испытания и балансировка кругов. Правила техники безопасности

Если установить на станок шлифовальный круг с трещинами или с превышением допустимой для него скорости резания, то при работе его разорвет. Поэтому предприятие-изготовитель испытывает каждый выпущенный им круг на наличие трещин и микротрещин. Круги диаметром более 150 мм испытывают на специальных станках при вращении со скоростью, в 1,5 раза превышающей рабочую скорость данного круга. Рабочую скорость обязательно указывают на торце круга. Запрещено хранить круги навалом. При хранении кругов желательно между ними проложить картонные прокладки. Перед установкой круга на станок его необходимо проверить на наличие трещин. Визуальная проверка покажет наличие больших трещин. Лучше провести проверку на звук. Круг подвешивают на нити и деревянным молотком простукивают. Дребезжащий звук означает наличие микротрещин – круг должен быть забракован. При установке круга на оправку недопустим непосредственный контакт металлических торцов оправки и круга – необходимы картонные прокладки.

При шлифовании возникают автоколебания, вызванные неуравновешенностью шпинделя, электродвигателя, кинематических передач и других частей шлифовального станка. Однако наибольшие колебания возникают при неуравновешенности самого шлифовального круга. Эти колебания опасны тем, что в круге возрастают напряжения (его может разорвать). Наличие

таких колебаний значительно ухудшает качество обработки, увеличивается вероятность прижогов, износ круга и станка. Предприятия-изготовители и предприятия крупносерийного производства испытывают шлифовальные круги на специальных балансировочных машинах. Выявленный дисбаланс исправляют, заливая свинцом дефектные участки круга. Перед установкой кругов диаметром более 80 мм их вместе с планшайбой балансируют вручную (статическая балансировка).

10.10.4. Абразивный инструмент

Абразивные материалы (абразив) – измельченные синтетические или естественные обогащенные зерна, твердость которых превышает твердость обрабатываемого материала. Высокая стабильность физико-механических свойств синтетических абразивных материалов резко ограничила область применения естественных материалов. В машиностроении применяются следующие абразивные материалы.

Электрокорунд состоит из корунда (Al_2O_3) и небольшого количества примесей. Нормальный электрокорунд содержит 92–95 % корунда, шлак и ферросплавы. Выпускаемые марки: 13А применяется для абразивного инструмента на органической связке; 14А – для абразивного инструмента на органической и керамической связках; 15А – для абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного класса.

Белый электрокорунд содержит 98–99 % корунда и алюминат натрия. Выпускаемые марки: 23А, 24А применяются для шлифовальных кругов, абразивной шкурки, для обработки свободным зерном; 25А – для абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного класса.

Хромистый электрокорунд получают в дуговых печах плавкой глинозема с добавкой оксида хрома. Абразив имеет повышенную механическую прочность и абразивную способность. Выпускаются марки: 33А – для абразивного инструмента на керамической связке, абразивной шкурки, для обработки свободным зерном; 34А – для абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного класса, абразивной шкурки, для обработки свободным зерном.

Титанистый электрокорунд марки 37А применяют для инструментов на керамической связке при обработке сталей. Цирконистый электрокорунд марки 38А используют в инструментах для обдирочного шлифования и шлифования с высокими скоростями.

Сферокорунд (марка ЭС) получают в виде полых корундовых сфер. Абразив эффективен при обработке мягких и вязких материалов (кожа, резина, пластмасса, сплавы цветных металлов).

Монокорунд марок 43А, 44А применяют для абразивного инструмента на керамических связках, марки 45А – для абразивного прецизионного инструмента. Корунд марки 92Е используют для полирования деталей из стекла и металлов.

Техническое стекло – бой листового и бутылочного стекла. Марка 71Г

применяется для обработки дерева.

Кремень марки 81 применяют для обработки дерева, кожи, эбонита.

Карбид кремния – химическое соединение кремния с углеродом. Черный карбид кремния марок 53С, 54С, 55С применяется для шлифования твердых сплавов, чугуна, цветных металлов, стекла, пластмасс. Зеленый карбид кремния марок 63С, 64С применяется для тонкого шлифования металлорежущего инструмента, твердых сплавов, керамики, правки шлифовальных кругов.

Карбид бора используют для доводочных операций.

Алмаз природный: марка А8 применяется для бурового и правящих инструментов; А5 – для абразивных инструментов на металлической связке, для дисковых пил; А3 – для абразивных инструментов на металлической связке; А1, А2 – для шлифования стекла, керамики и бетона; АМ – для полирования деталей из закаленных сталей, стекла; АМ5 – для сверхтонкой доводки и полирования.

Алмаз синтетический: марка АС2 применяется для инструментов на органических связках при чистовой обработке и доводке сталей и твердых сплавов; АС4 – для обработки керамики и других хрупких материалов; АС6 – для работы при повышенных нагрузках; АС15 – для работы в тяжелых условиях при резке стекла, шлифовании керамики и железобетона; АС20, АС32 – при бурении, хонинговании, правке шлифовальных кругов; АРВ1 – при хонинговании чугунов, резке стеклопластика; АСМ – для доводки и полирования закаленных сталей и твердых сплавов; АСМ5, АСМ1 – для сверхтонкой доводки.

Кубический нитрид бора (эльбор, кубонит) синтезирован из нитрида бора, упакованного в гексагональную решетку; имеет более высокую, чем у алмаза, теплостойкость, не имеет химического сродства к железу. Марки ЛО, ЛП применяются для изготовления абразивного инструмента на органической, керамической и металлической связках, абразивных паст и шкурок; марки КР, КО, КОС – для изготовления шлифовальных порошков.

В зависимости от размера зерен шлифовальные материалы делятся на четыре группы:

- шлифовальное зерно (160–2000 мкм);
- шлифовальные порошки (40–125 мкм);
- микрошлифовальные порошки (14–63 мкм);
- тонкие микрошлифовальные порошки (3–10 мкм).

Совокупность абразивных зерен шлифовального материала в установленном интервале размеров называют *фракцией*. Фракцию, преобладающую по массе, объему или числу зерен, называют *основной*. Характеристику конкретной совокупности абразивных зерен, выраженную размерами зерен основной фракции, называют *зернистостью*.

В зависимости от группы материалов приняты следующие обозначения зернистости:

шлифовальное зерно и шлифовальные порошки – 0,1 размера стороны ячейки сита, на котором при просеивании задерживаются зерна основной

фракции (например, 40 соответствует зерну 400 мкм);

микрошлифовальные порошки – по верхнему пределу размера зерен основной фракции с добавлением индекса М (например, М40 – зерно 40 мкм);

алмазные шлифовальные порошки – дробь: числитель – размер стороны ячейки верхнего сита, знаменатель – размер стороны ячейки нижнего сита (например, 400/250 обозначает основную фракцию от 400 до 250 мкм);

алмазные микропорошки и субмикропорошки – дробь: числитель – наибольший, знаменатель – наименьший размер основной фракции (например, 40/28);

шлифовальное зерно и шлифовальные порошки эльбора – в зависимости от метода контроля: при ситовом контроле дробь по обозначениям аналогична алмазным шлифовальным порошкам.

При обозначении алмазных шлифовальных порошков указывается марка шлифовального материала, зернистость и стандарт.

Например: шлиф-порошок АС6 160/125 ГОСТ 9206–80; микропорошок АСН 40/28 ГОСТ 9206–80; субмикропорошок АСМ5 0,5/0,1 ГОСТ 9206–80.

Связка абразивных инструментов – вещество или совокупность веществ, применяемых для закрепления шлифовальных зерен и наполнителя. Связка влияет на геометрию рельефа рабочей поверхности круга, его износ, параметры шероховатости обработанной поверхности.

Керамические связки (К1–К10) используются для всех основных видов шлифования, кроме прорезки узких пазов, обдирочных работ: К2, К3 – для инструмента из карбида кремния; К2 – для мелкозернистого инструмента; К1, К5, К8 – для инструмента из электрокорунда; К1 – для шлифования и заточки алмазным кругом твердосплавного режущего инструмента совместно со стальной державкой или корпусом.

Бакелитовые связки (Б, Б1, Б2, Б3, Б4, БП2, БУ) применяются для изготовления кругов с упрочненными элементами для шлифования при скоростях 60–100 м/с: обдирочное шлифование; плоское шлифование торцом круга; отрезка; прорезка пазов; заточка режущих инструментов; шлифование прерывистых поверхностей; изготовление мелкозернистых кругов для отделочного шлифования, алмазных и эльборовых кругов, хонинговальных брусков.

Вулканитовая, глифталева, поливинилформалева связки (В, В1, В2, В3, В5, ГФ, ПФ, Э5, Э6) используются для изготовления ведущих кругов для бесцентрового шлифования, гибких кругов для полирования и отделки (В5), кругов для отрезки, прорезки и шлифования пазов, профильного шлифования.

Металлические связки применяются для изготовления алмазных кругов повышенной износостойкости для обработки твердых сплавов, кругов для электрохимической абразивной обработки.

Органические связки с металлическим наполнителем применяются для изготовления алмазных кругов для заточки твердосплавного режущего

инструмента, шлифования твердосплавных или керамических деталей, профильного шлифования. Органические связки с минеральным наполнителем используются для изготовления алмазных кругов для чистовой заточки твердосплавного режущего инструмента, чистового шлифования твердосплавных деталей.

Абразивный инструмент на твердой основе. *Твердость абразивного инструмента* – величина, характеризующая его свойство сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой при сохранении характеристик инструмента в пределах установленных норм. Установлена следующая шкала твердостей: ВМ1, ВМ2 – весьма мягкие; М1, М2, М3 – мягкие; СМ1, СМ2 – среднемягкие; С1, С2 – средние; СТ1, СТ2, СТ3 – средне-твердые; Т1, Т2 – твердые; ВТ – весьма твердые; ЧТ – чрезвычайно твердые.

Мягкие и среднемягкие круги (М1–СМ2) используют для плоского шлифования кругами на бакелитовой основе, шлифования периферией керамическими кругами, шлифования деталей из твердых сплавов, закаленных сталей, цветных металлов и их сплавов.

Среднемягкие и средние связки (СМ2–С2) применяют для чистового шлифования, шлифования резьб с крупным шагом.

Средние и среднетвердые круги (С2–СТ2) используют для шлифования и резьбошлифования заготовок из незакаленных сталей, чугуна, вязких материалов, хонингования.

Среднетвердые и твердые круги (СТ2–Т2) применяют для обдирочного и предварительного шлифования, шлифования профильных и прерывистых поверхностей, заготовок малого диаметра, бесцентрового шлифования, хонингования закаленных деталей.

Весьма твердые и чрезвычайно твердые круги (ВТ, ЧТ) используют для шлифования шариков подшипников, правки шлифовальных кругов.

Структура абразивного инструмента на твердой основе определяется соотношением объемов шлифовального материала, связки и пор. Различают 16 номеров структур. Абразивные инструменты зернистостью 125–80 изготавливают структурами 3 и 4, зернистостью 50–40 – структурами 5 и 6, зернистостью 25–12 – структурами 6 и 7. Круги высших номеров структуры изготавливают высокопористыми, поры и капилляры сообщаются между собой за счет использования выгорающего парообразователя, который обязательно указывается в характеристике таких кругов.

Тип и размеры шлифовальных кругов зависят от размеров и конфигурации обрабатываемой заготовки, требований к результатам обработки, вида обработки и характеристик станка:

круги прямого профиля (тип 1) – наиболее распространенная форма;

кольцевые круги (тип 2) применяются для плоского шлифования торцом круга, крепятся на планшайбе с помощью цементирующих веществ;

круги с коническим профилем (типы 3, 4), *круги с выточками* (типы 5, 7, 10, 23) имеют универсальное применение. Благодаря выточкам имеется

лучший доступ круга при подводе к обрабатываемой поверхности, возможность одновременной обработки цилиндрической и торцевой поверхностей, обработки буртов, фланцев и др.

Чашечные круги (тип 6) предназначены для заточки и доводки режущего инструмента, внутреннего и плоского шлифования; *чашечные конические круги* (тип 11) предназначены для заточки и доводки режущего инструмента, плоского шлифования в случаях, когда затруднено применение кругов других типов; *тарельчатые круги* (тип 14) применяют для резьбо-, шлице- и зубошлифования, заточки многозубых режущих инструментов; *круги с запрессованными крепежными элементами* (тип 36) используются для плоского шлифования протяженных поверхностей торцом круга.

Абразивный инструмент на гибкой основе с нанесенным слоем (слоями) абразива, закрепленного связкой, называют *шлифовальной шкуркой*. Шлифовальные шкурки выпускают на бумажной, тканевой, комбинированной, фибровой и других основах. В зависимости от вида основы и свойств связки различают шкурку водостойкую, неводостойкую, термостойкую и др. В зависимости от числа слоев шлифовального материала, нанесенных на шкурку, различают одно- и двухслойную шкурку. Если шлифовальный слой нанесен на обеих сторонах основы, шкурка называется двухсторонней.

Шлифовальный лист – полоса прямоугольной формы длиной до 1000 мм, шириной 70–1000 мм.

Шлифовальная лента – полоса прямоугольной формы, ширина которой значительно меньше ее длины. Шлифовальную ленту с замкнутым контуром называют *бесконечной шлифовальной лентой*. Несклеенная лента называется *бобиной* (выпускается длиной 25–100 м, шириной 2,5–1500 мм).

Шлифовальный диск – шкурка в форме круга. Диски могут иметь радиальные прорези.

Шлифовальная трубка – шкурка в форме цилиндра. Если диаметр шлифовальной трубки равен ее высоте или больше ее, трубку называют *шлифовальным кольцом*.

Шлифовальный (тип К) или *усеченный конусы* (тип КУ) – шкурки в виде соответствующих геометрических фигур.

Перспективные виды шлифовальных кругов. В последнее время в машиностроении применяется высокоскоростное и силовое шлифование, поэтому перспективным направлением является изготовление кругов высокопрочных форм или упрочнение круга (рис. 10.66, а).

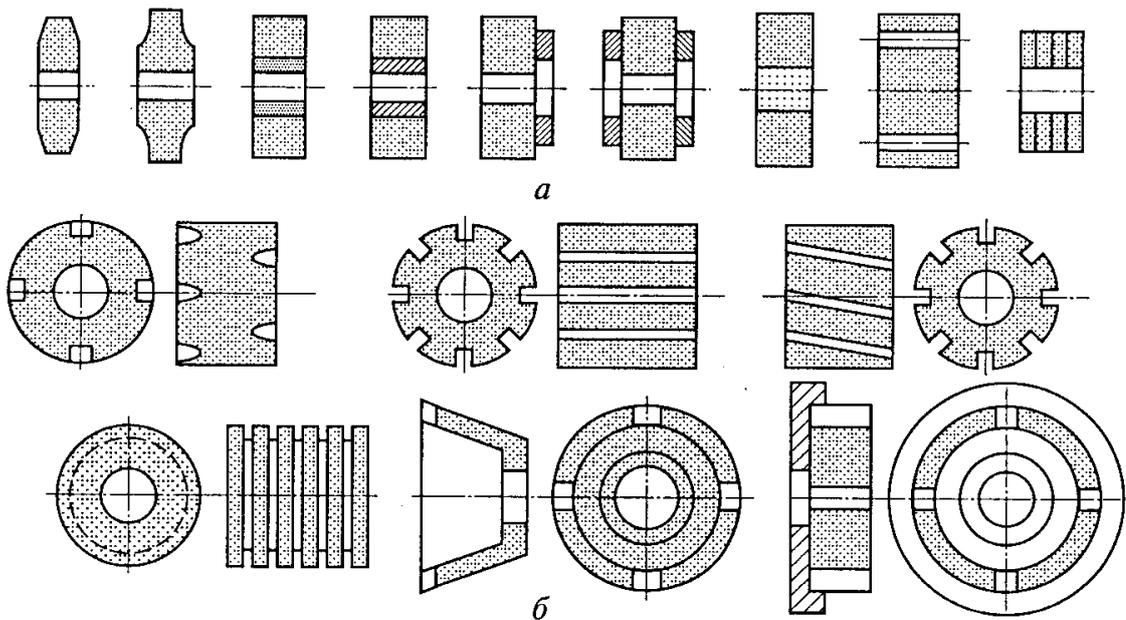


Рис. 10.66. Перспективные виды шлифовальных кругов:
 а – круги высокопрочных форм; б – круги с прерывистой рабочей поверхностью

Высокопрочным является круг, сечением которого является балка равного сопротивления или трапеция. Однако профилирование и эксплуатация таких кругов вызывает некоторые затруднения. Упрочнения круга можно добиться, если область, прилегающую к посадочному отверстию, выполнить из плотного и прочного абразивного материала, так как именно она испытывает наибольшие напряжения. По этой же причине в круги клеивают металлическую или полимерную втулку. Круги, работающие периферией, упрочняют одним или двумя стальными кольцами, приклеенными к торцу. Круги, работающие торцом, выполняют без центрального отверстия. Центральную часть, не несущую значительные нагрузки, выполняют из низкокачественного абразива. На шпиндель станка круг устанавливается с помощью стальной планшайбы, приклеенной к торцу круга. Как вариант возможно крепление круга за крепежные отверстия, равномерно расположенные по окружности. Армирование кругов прокладками из стекловолокна также является упрочнением.

Перспективным направлением повышения производительности и качества шлифования является применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью (рис. 10.66, б): с выточками, пазами, спиральными прорезями, канавками, насечками; к ним относятся и сегментные круги.

10.10.5. Станки шлифовальной группы

В условиях единичного и серийного производства широко используются универсальные круглошлифовальные, плоскошлифовальные и бесцентрово-шлифовальные станки.

Круглошлифовальный станок представлен на [рис. 10.67, а](#). На верхних направляющих станины 8 установлен стол 1. На верхней, поворотной части 2 стола размещен поворотный суппорт 10 с передней 4, задней 17 бабками и коробкой скоростей 3. На задней части станины расположена шлифовальная бабка 6 с абразивным кругом 5. Стол станка перемещается в продольном направлении штоком 11 гидроцилиндра 9. При шлифовании длинных конических поверхностей заготовка устанавливается в центрах передней и задней бабок. Верхняя часть стола поворачивается на половину угла при вершине конуса заготовки. При шлифовании коротких конусных поверхностей заготовку зажимают в патроне передней бабки, которую поворачивают на требуемый угол с помощью поворотного суппорта.

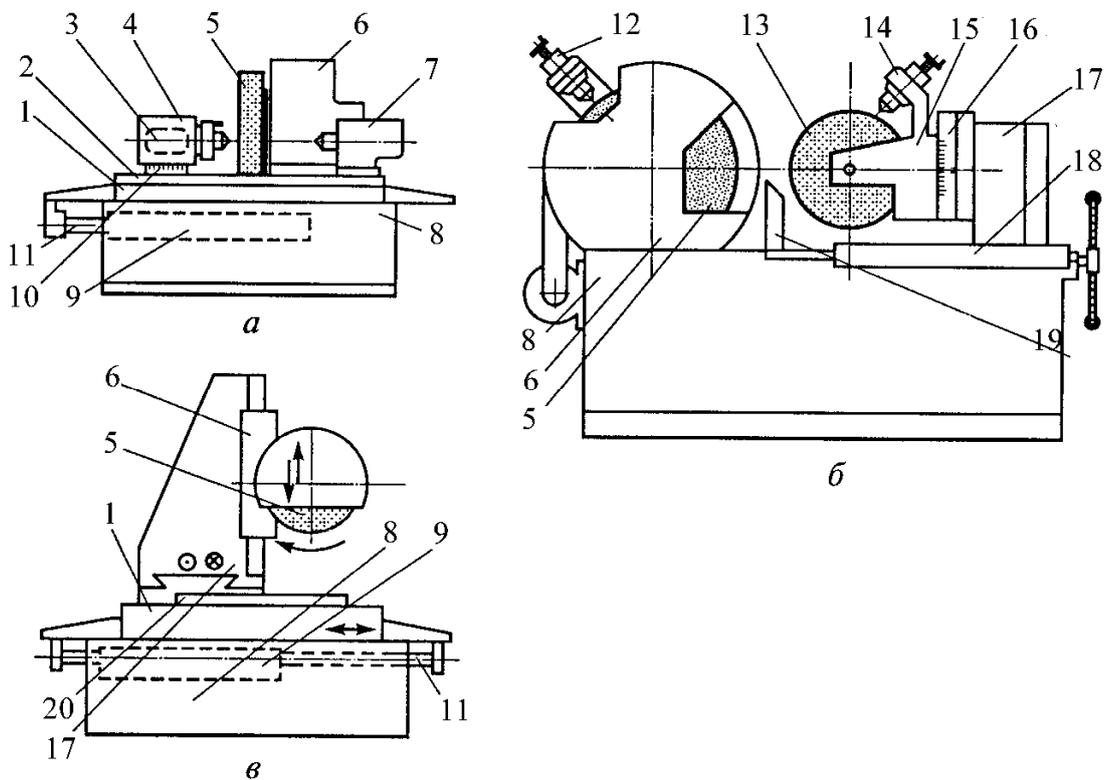


Рис. 10.67. Станки шлифовальной группы: а – круглошлифовальный; б – бесцентрово-шлифовальный; в – плоскошлифовальный; 1 – стол; 2 – верхняя, поворотная часть стола; 3 – коробка скоростей; 4 – передняя бабка; 5 – абразивный круг; 6 – шлифовальная бабка; 7 – задняя бабка; 8 – станина; 9 – гидроцилиндр; 10, 16 – поворотные суппорты; 11 – шток; 12, 14 – механизмы правки; 13 – ведущий круг; 15 – бабка ведущего круга; 17 – задняя бабка (колонна); 18 – стол ведущего круга; 19 – нож; 20 – магнитная плита

Внутришлифовальный станок имеет аналогичную компоновку. Однако у него нет задней бабки, а шлифовальная бабка выполнена консольной. Так как круги для внутришлифовальных работ имеют малый диаметр, механизм главного движения должен обеспечить высокие обороты шлифовального круга (до 10 000 об/мин). Производительность внутришлифовальных станков невысока, так как консольное расположение шлифовальной бабки и консольное закрепление шлифовального круга не обеспечивают необходимой

жесткости системы СПИД. Кроме того, требуется частая правка круга.

Бесцентрово-шлифовальный станок представлен на [рис. 10.67, б](#). На станине 8 размещена шлифовальная бабка 6 с абразивным кругом 5. На верхних направляющих станины установлен стол и вертикальная колонна 17 с поворотным суппортом 16 и бабкой 15 ведущего круга 13. Каждый из кругов периодически правят с помощью механизмов для правки 12 и 14. Заготовку устанавливают на нож 19 между шлифовальным и ведущим кругами, которые выбираются таким образом, чтобы трение между заготовкой ведущим кругом было больше трения между заготовкой и шлифовальным кругом. Если необходимо продольное перемещение заготовки, ведущий круг поворачивают на угол 1–7° относительно оси заготовки. В результате появляется осевая составляющая силы трения, которая придает заготовке осевое движение подачи, и гладкие цилиндрические заготовки (цилиндры, кольца) можно подавать непрерывно, что резко повышает производительность обработки.

Плоскошлифовальный станок показан на [рис. 10.67, в](#). На поперечных направляющих станины 8 установлена вертикальная колонна 17, по вертикальным направляющим которой перемещается шлифовальная бабка 6 с абразивным кругом 5. Круг частично закрыт защитным кожухом. По горизонтальным направляющим станины перемещается стол 1. Продольные движения стола осуществляются штоком 11 гидроцилиндра 9. В направляющих стола могут устанавливаться заготовка, машинные тиски, синусные тиски или стол, магнитная плита (стол) 20. На магнитной плите могут размещаться заготовка, синусные тиски или стол.

10.10.6. Технологические требования к деталям, обрабатываемым шлифованием

Базовые поверхности ([рис. 10.68](#)) необходимо предварительно обрабатывать. Они должны обеспечивать точную и надежную установку и закрепление заготовки.

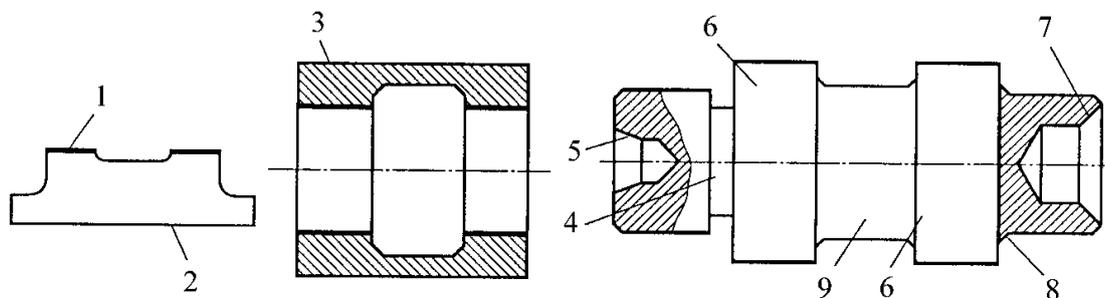


Рис. 10.68. Технологические требования к заготовкам, обрабатываемым шлифованием: 1 – обрабатываемая поверхность; 2, 3, 5, 7 – базовые поверхности; 4 – технологическая канавка; 6 – точные поверхности; 8 – галтель; 9 – проточка

При обработке поверхностей 1 (рис. 10.68) на плоскошлифовальных станках в качестве базовой необходимо выбрать наиболее развитую плоскость 2. При базировании в патроне в качестве базовой следует принять цилиндрическую поверхность 3, при базировании в центрах – центровые отверстия 5 или установочные фаски 7. Между шейками вала и торцами, из-за непрерывного осыпания круга, образуется галтель 8. Если галтель недопустима, следует предусмотреть переходную технологическую канавку 4 для выхода шлифовального круга. Точные поверхности 6 необходимо разделять проточками 9, которые можно не обрабатывать. Желательно избегать конструирования поверхностей с большим перепадом диаметров. При подрезании торца после протягивания шлицов желательно иметь наружные выточки, которые обеспечат безударную работу резца.

10.11. Отделочные операции

Тенденциями развития современной авиационной и автомобильной техники являются увеличение скоростей движения, уменьшение удельной массы (отношение массы машины к ее мощности) и повышение надежности конструкций. В связи с этим возрастают требования к точности обработки деталей машин, что связано с применением отделочных (финишных) операций.

Для отделочных методов обработки характерны небольшие толщины срезаемого слоя, незначительные силы резания и тепловыделение. Отделочная обработка позволяет повысить точность обработанной поверхности, нанести на нее необходимый микрогеометрический рисунок, повысить эксплуатационные свойства детали.

К отделочным видам обработки относятся: тонкое шлифование; алмазное точение и фрезерование; хонингование; суперфиниширование; доводка (притирка); полирование; ленточное шлифование; абразивно-жидкостная обработка; виброабразивная обработка; магнитно-абразивная обработка.

Тонкое шлифование производят мягкими мелкозернистыми шлифовальными кругами на больших скоростях резания (от 35 м/с) с обильной подачей СОТС. Процесс характеризуется снятием малых припусков (0,04–0,08 мм на сторону), малыми подачами (0,005–0,1 мм/об), частой правкой круга. Перед окончанием обработки шлифовальный круг работает без подачи (выхаживание). При этом сьем металла происходит за счет упругих сил в технологической системе СПИД с постепенным уменьшением силы резания. Процесс осуществляется на станках высокой и особо высокой точности, обеспечивающих плавность хода всех механизмов, высокой жесткости и виброустойчивости технологической системы СПИД. Тонкое шлифование требует хорошей фильтрации СОТС, чтобы исключить попадание абразива и стружки в зону шлифования.

Прецизионная обработка (тонкое точение и растачивание, алмазное

точение, тонкое фрезерование) характеризуется высокими скоростями резания (100–1000 м/мин), малыми подачами (0,01–0,15 мм/об), малой глубиной резания (0,05–0,3 мм) при высокой виброустойчивости технологической системы СПИД. Стальные заготовки с прерывистой обрабатываемой поверхностью (наличие пазов, шлицов, отверстий), детали из высокопрочных сталей и чугуна обрабатывают при скоростях резания до 50 м/мин (при применении инструментов с режущей частью из сверхтвердых материалов скорость резания можно повысить до 150 м/мин). Рекомендации по применению инструментальных материалов приведены в табл. 7.18.

Прецизионная обработка позволяет получить шероховатость поверхности Ra 0,02–0,63 мкм, точность по 5–9-му квалитетам.

Хонингование – отделочный метод обработки внутренних поверхностей абразивными брусками.

Хонингование применяется в условиях серийного и массового производства после операций растачивания, развертывания, протягивания и шлифования для повышения точности формы, размера и снижения шероховатости поверхности отверстий, создания специфического микропрофиля обработанной поверхности. Обработку производят с помощью абразивных или алмазных брусков, закрепленных в хонинговальной головке (хон). Бруски, закрепленные на хонинговальной головке, совершают возвратно-поступающие движения вдоль оси обрабатываемого отверстия (рис. 10.69, а).

Хону, как правило, сообщают три движения: вращение, возвратно-поступательное перемещение и радиальное движение подачи. При вибрационном хонинговании хону или заготовке придают дополнительное круговое или возвратно-поступательное движение с малой амплитудой (1–4 мкм) и частотой до 20 двойных ходов в минуту.

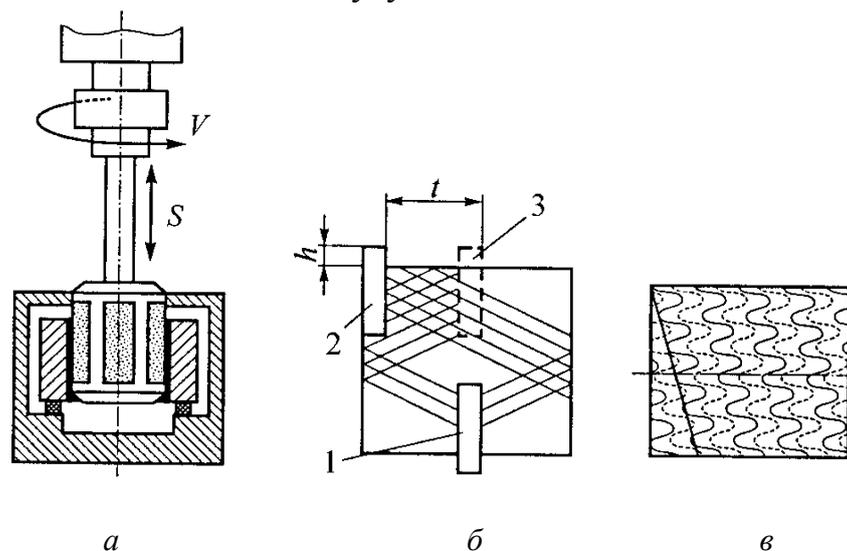


Рис. 10.69. Развертка обработанной поверхности: а – схема хонингования отверстия; б – обычное хонингование: 1, 2 – нижнее и верхнее положение брусков соответственно; 3 – смещение бруска на один шаг; h – перебег; t – шаг смещения брусков; в – вибрационное хонингование

На [рис. 10.69, а](#) показана развертка обработанной поверхности и схема образования сетки. Нижнее 1 и верхнее 2 положения абразивных брусков устанавливаются с перебегом h , который необходим для точной обработки отверстия. Минимальные отклонения формы получаются при перебеге h , равном 0,33 длины бруска, и длине бруска, равной 0,5–0,75 длины обрабатываемого отверстия. При каждом двойном ходе бруски оказываются в положении 3, т. е. смещаются на шаг t . Можно менять угол наклона сетки. При вибрационном хонинговании вид сетки изменится ([рис. 10.69, б](#)).

По характеру крепления брусков в хоне различают хоны с подпружиненными брусками (при обработке отверстий не исправляются такие погрешности формы, как непрямолинейность оси отверстия) и хоны с жестким креплением брусков (при обработке происходит исправление всех погрешностей формы, но точность обработки ниже).

Хонинговальные бруски изготавливают из электрокорунда, карбида кремния или синтетических алмазов.

Суперфиниширование – отделочный метод обработки наружных поверхностей мелкозернистыми абразивными брусками, совершающими колебательные движения с амплитудой 2–5 мм и частотой до 2000 двойных ходов в минуту.

Метод применяют для отделочной обработки трущихся поверхностей, когда необходимо повысить их эксплуатационные свойства. Суперфинишированием обеспечивается малая шероховатость (Ra 0,05–0,6 мкм), уменьшение погрешностей формы до 0,3 мкм, нанесение на поверхность оптимального микрогеометрического рисунка, сглаживание вершук микронеровностей (увеличение площади фактической опорной поверхности).

К преимуществам суперфиниширования можно отнести простоту применяемого оборудования, возможность использования универсальных токарных или шлифовальных станков, головок-вибраторов, высокую производительность и простоту автоматизации процесса.

Сущность процесса суперфиниширования состоит в микрорезании обрабатываемой поверхности одновременно большим количеством мельчайших абразивных зерен (до 10 000 зерен/мм²). При этом снимаются тончайшие стружки (до 0,01 мм), а скорость съема металла достигает 1–1,5 мкм/с. Большинство зерен не режет, а пластически деформирует металл – микронеровности сглаживаются, и поверхность получает зеркальный блеск.

Разновидностью суперфиниширования является микрофиниширование, характеризующееся большими давлениями на брусок и жесткой фиксацией брусков, что значительно уменьшает погрешности предшествующей обработки.

Доводка (притирка) – отделочная операция, при которой съем металла с обрабатываемой поверхности производится абразивными зернами, свободно распределенными в пасте или суспензии, нанесенной на поверхность притира. Эта наиболее трудоемкая отделочная операция выполняется на малых

скоростях при переменном направлении рабочего движения притира и позволяет получить шероховатость обработанной поверхности $Rz\ 0,01-0,05\ \mu\text{м}$, отклонения формы – $0,05-0,3\ \mu\text{м}$.

Различают доводку ручную, полумеханическую и механическую. *Ручная доводка* применяется в единичном и мелкосерийном производстве, а также при обработке деталей сложной формы. Точность и качество обработки зависят от квалификации рабочего. Высококвалифицированный специалист обеспечивает точность формы в пределах $0,5-2\ \mu\text{м}$.

Полумеханическую доводку выполняют при помощи электрических или пневматических доводочных приспособлений. Главное движение выполняется приспособлением, а движение подачи – от руки.

Механическая притирка применяется в крупносерийном и массовом производстве на специальных притирочных станках.

Сущность доводки (притирки) заключается в сочетании химического воздействия кислой среды пасты с механическим воздействием абразива.

Полирование – это заключительная операция механической обработки заготовки, выполняемая с целью уменьшения шероховатости поверхности и придания ей зеркального блеска. Полирование обеспечивает шероховатость поверхности $Ra\ 0,02-0,16\ \mu\text{м}$, $Rz\ 0,05-0,1\ \mu\text{м}$.

Операция осуществляется механическими, химическими, электромеханическими и другими методами. Различают полирование кругами, лентами, абразивно-жидкостную, виброабразивную и магнитно-абразивную обработку.

Полирование мягкими абразивными кругами применяется при декоративной окончательной отделке деталей или при подготовке поверхности под гальванические покрытия. В процессе полирования обрабатываемая поверхность заготовки под давлением прижимается к рабочей поверхности вращающегося абразивного круга, на которой закреплен слой абразива или нанесена полировальная паста. Обработка ведется на простых по конструкции или универсальных станках, с помощью ручных полировальных машин.

Промышленностью выпускаются следующие виды полировальных кругов: лепестковые, эластичные, войлочные, тканевые, бумажные, фетровые, хлопчатобумажные, гибкие и др.

Лепестковые полировальные круги различаются по способу крепления абразивных лепестков в ступице круга.

Армированные неразборные круги с клеевым креплением лепестков (рис. 10.70, а) предназначены для декоративно-полировальных работ. Круги состоят из двух штампованных фланцев 1 и приклеенных к ним (и между собой) лепестков 2. В качестве клея применяется композиция на основе эпоксидной смолы.

Армированные разборные круги с клеевым соединением лепестков и механическим креплением блока с арматурой (рис. 10.70, б) применяются на универсальных плоскошлифовальных и круглошлифовальных станках. Круги состоят из алюминиевой ступицы 4, двух фланцев 1, стягивающих болтов 3 и

набора лепестков 2. Предварительную установку и крепление лепестков осуществляют при помощи кольцевых выступов фланцев, входящих в радиусные пазы лепестков. Лепестки связаны в единый блок при помощи композиции на основе эпоксидной смолы.

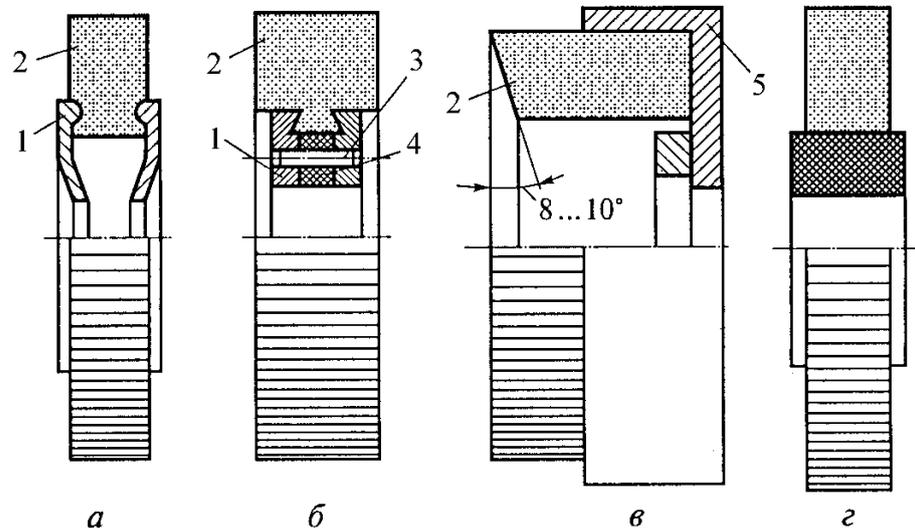


Рис. 10.70. Лепестковые полировальные круги: *а* – армированные неразборные; *б* – армированные разборные; *в* – торцевые; *г* – безарматурные; 1 – фланец; 2 – лепесток; 3 – болт; 4 – ступица; 5 – планшайба

Торцевые лепестковые круги (рис. 10.70, *в*) состоят из сборной планшайбы 5 и набора лепестков 2, закрепленных в планшайбе при помощи композиции на основе эпоксидной смолы. Торцевой круг имеет угол поднутрения торца лепестков 8–10°. При установке круга лепестки разворачиваются в радиальном направлении в сторону вращения круга на этот угол. Лепестковые круги диаметром до 500 мм можно изготавливать безарматурными (рис. 10.70, *г*).

Войлочные круги обладают большой эластичностью, хорошо поддаются правке, достаточно прочно удерживают нанесенные на них абразивные порошки и пасты. Войлочные круги подразделяются на тонкие, полугрубошерстные и грубошерстные. Первые применяются при обработке ответственных деталей машин и приборов, вторые – для полирования хирургических инструментов, деталей точных измерительных приборов, стекла. В остальных случаях применяются грубошерстные круги.

Тканевые полировальные круги являются наиболее распространенными. Их изготавливают диаметром 150–500 мм. Скорость резания равна 80–85 м/с.

Гибкие полировальные круги. Наиболее прогрессивным полировальным инструментом являются гибкие полировальные круги, отличающиеся от обычных абразивных кругов большой эластичностью, высокой

термостойкостью и механической прочностью. Они изготавливаются прессованием и вулканизацией смеси каучукосодержащих связок с абразивными зёрнами.

Полировальные пасты и суспензии. При полировании применяются абразивные пасты и суспензии, изготавливаемые в основном по техническим условиям потребителей.

Полировочные пасты содержат мягкие абразивы: оксиды железа, хрома, алюминия, венскую известь, маршалит; зернистость составляет менее 1 мкм. В состав паст также входят плавкие связки, смазывающие вещества и поверхностно-активные вещества (ПАВ). В качестве связки используются стеарин, парафин, воск, олеиновая кислота, вазелин, свиной жир (лярд). Смазывающим материалом служат керосин, бензин, вода, трансформаторное или иные масла. В качестве ПАВ обычно используются олеиновая или стеариновая кислота.

По консистенции пасты подразделяются на твердые (Т) и мазеобразные (М), по концентрации – на повышенные (П) и нормальные (Н), по смываемости – на смываемые органическими растворителями (О), смываемые водой (В), смазываемые органическими растворителями и водой (ВО).

Наибольшее применение в промышленности получили пасты ГОИ (Государственный оптический институт), воздействие которых на обрабатываемую поверхность одновременно и механическое, и химическое. Номер пасты соответствует ее абразивной способности.

Суспензии состоят из микропорошка и жидкости. В зависимости от условий обработки концентрация микропорошка составляет от 1:5 до 1:1.

Приготовление суспензий достаточно просто: вначале смешивают жидкие компоненты (керосин, веретенное масло, стеарин), затем при непрерывном помешивании добавляют абразивный порошок.

Абразивно-жидкостная обработка, применяемая для полирования сложных фасонных поверхностей, заключается в подаче на обрабатываемую поверхность суспензии под давлением и с большой скоростью. Абразивные зёрна, срезая выступы микронеровностей, создают эффект полирования. При подаче суспензии с воздухом повышается производительность обработки, но увеличивается шероховатость поверхности.

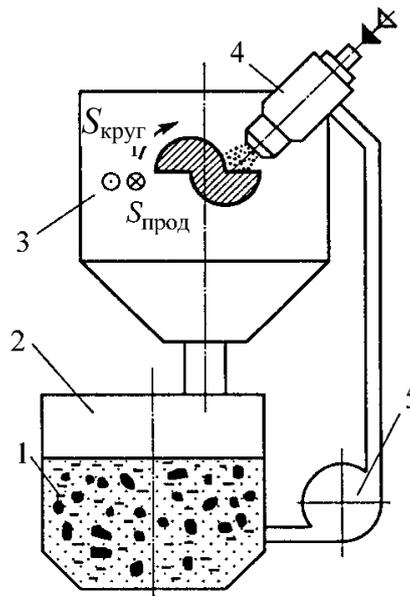


Рис. 10.71. Установка для абразивно-жидкостной обработки:
1 – суспензия; 2 – бак; 3 – рабочая камера; 4 – сопло; 5 – насос

Установка для абразивно-жидкостной обработки (рис. 10.71) состоит из рабочей камеры 3 с обрабатываемой заготовкой, твердосплавного сопла 4 для подачи абразивной суспензии 1 из бака 2 и насоса 5. Наибольший съем металла получается при угле наклона сопла 45° .

Виброабразивная обработка. Для повышения производительности и качества отделочных операций часто используется вибрационная обработка в абразивной среде. Главное движение резания осуществляют абразивные зерна, совершающие колебания под воздействием внешней возмущающей силы (вибраций). Рабочая среда и заготовки при этом перемещаются, совершая колебания в двух плоскостях и медленное вращение всей массы. В рабочей среде детали расположены хаотично и занимают случайное положение, что обеспечивает равномерную обработку всех поверхностей. Большое количество микроударов поддерживает заготовки во взвешенном состоянии, благодаря чему исключается образование грубых забоин и повреждений. Обработку можно производить всухую или с подачей жидкого раствора, который обеспечивает удаление продуктов изнашивания, равномерное распределение заготовок по объему контейнера и химико-механический процесс съема металла.

Магнитно-абразивное полирование (МАП) применяется для полирования плоских, цилиндрических или фасонных поверхностей заготовок из магнитных и немагнитных материалов. За 10–40 с достигается шероховатость обработанной поверхности $Ra\ 0,032\text{--}0,2\ \mu\text{м}$, исправляются погрешности геометрической формы.

Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в следующем. Заготовкам, помещенным в магнитное силовое поле, сообщают вращательное

движение вокруг оси и осциллирующее движение вдоль оси. Возбуждаемый в сердечниках электромагнита поток пронизывает заготовки в диаметральном направлении. В контейнер с заготовками подается порошок, обладающий абразивными и магнитными свойствами, и СОТС. Магнитное поле выполняет роль связки, формирующей из отдельных абразивных зерен эластичный абразивный инструмент, и обеспечивает силовое воздействие, с помощью которого абразиву сообщаются нормальные и тангенциальные силы резания.

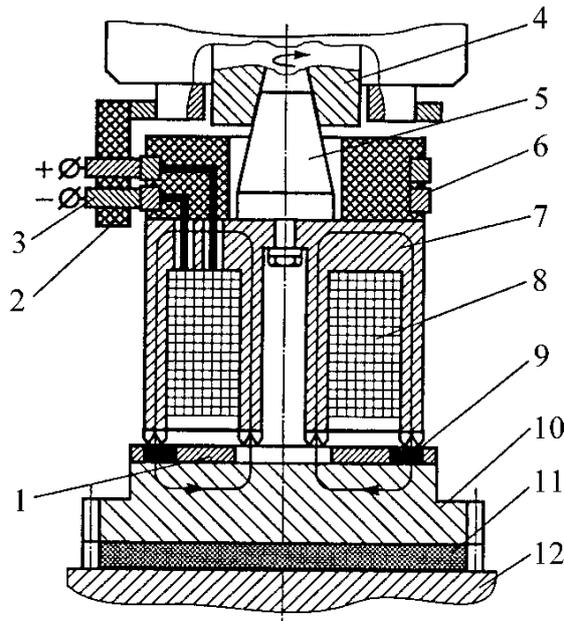


Рис. 10.72. Установка для магнитно-абразивной обработки: 1 – трафарет; 2 – кронштейн; 3 – токосъемник; 4 – шпиндель; 5 – оправка; 6 – контактные кольца; 7 – электромагнитный индуктор; 8 – катушки электромагнита; 9 – заготовка; 10 – рабочая плита; 11 – прокладка; 12 – стол

СОТС – носитель поверхностно-активных веществ. В зоне обработки возникает процесс электролиза. Анодное растворение поверхностного слоя заготовок ускоряет процесс обработки. Анодное растворение поверхностных слоев абразива обеспечивает их самозатачиваемость.

Схема установки для магнитно-абразивного полирования приведена на [рис. 10.72](#). Между столом 12 станка и рабочей плитой 10 установлена немагнитная, неэлектропроводная прокладка 11. На рабочей плите размещаются трафарет 1 и заготовки 9. На шпиндель 4 станка надета оправка 5 с корпусом электромагнитного индуктора 7 и катушками 8 электромагнита. Напряжение на катушки электромагнита подается через контактные кольца 6 токосъемником 3, установленным на кронштейне 2.

Магнитно-абразивное полирование происходит с подачей в зону обработки 5–10%-ного раствора эмульсола марки Э-2 в воде. Абразивные порошки для МАП должны обладать высокой магнитной индукцией насыщения, магнитной проницаемостью, абразивными свойствами, теплопроводностью, химической стойкостью и низкой электропроводностью.

ГЛАВА 11. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Появление новых конструкционных материалов, повышение требований к точности обработки, специфические требования к качеству поверхностного слоя обусловили необходимость применения новых методов обработки, основанных на иных, чем резание, физических процессах. К таковым относятся: обработка поверхности поверхностным пластическим деформированием; электрофизические и электрохимические методы обработки; светолучевая и плазменно-лучевая обработка.

Электрофизические и электрохимические методы используются для формообразования поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов (весьма вязких, твердых и очень твердых, керамических, металокерамических) и позволяют обрабатывать сложные фасонные внешние и внутренние поверхности, отверстия малых диаметров и т. д.

При электрофизических и электрохимических методах механические нагрузки на обрабатываемую поверхность настолько малы, что практически не влияют на точность обработки. При этом образуется незначительный дефектный слой (в ряде случаев), не появляется наклеп обработанной поверхности, устраняются прижоги после шлифования, повышаются эксплуатационные характеристики поверхностного слоя (износостойкость, коррозионная стойкость, прочность). Простота кинематических цепей станков для этих методов позволяет обеспечивать автоматизацию обработки и точное регулирование процессов формообразования.

Все электрофизические и электрохимические методы условно подразделяются на обработку:

электроэрозионную (электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная);

электрохимическую (электрохимическая, анодно-механическая);

химическую (химическая, химико-механическая);

импульсно-механическую (ультразвуковая, электрогидравлическая);

лучевую (светолучевая, электронно-лучевая);

плазменную и взрывную.

11.1. Электрофизические методы обработки поверхностей заготовок

Электроэрозионная обработка. Метод основан на разрушении (эрозии) поверхности заготовки, происходящем в результате теплового воздействия импульсов электрического разряда, которые возникают между электродами (инструментом и заготовкой). Электрический разряд между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектрод-

ного промежутка диэлектрической жидкостью (керосин, минеральное масло). Эрозия электродов в жидкой среде происходит значительно интенсивнее.

При замыкании электрической цепи межэлектродное пространство ионизируется. При достижении пороговой разности потенциалов образуется канал проводимости, по которому проходит искровой или дуговой разряд. За время 10^{-8} – 10^{-5} с плотность тока возрастает до 8–10 кА/мм². В результате температура на поверхности заготовки возрастает до 10 000–12 000 °С, что влечет плавление, испарение и выброс частиц материала с поверхности заготовки. Следующий импульс тока пробивает межэлектродный промежуток там, где расстояние между электродами окажется минимальным. Эрозия металла происходит до тех пор, пока расстояние между электродами не окажется больше критического (0,01–0,05 мм). При сближении электродов процесс эрозии повторяется. Кроме теплового имеют место электростатическое, электродинамическое воздействие и кавитационные явления.

Электроискровая обработка основана на использовании импульсного искрового разряда между анодом (заготовкой) и катодом (инструментом). Технологические параметры электроискровой обработки приведены в [табл. 11.1](#), принципиальная схема процесса показана на [рис. 11.1](#). В ванне с диэлектрической жидкостью 4 размещены подставка-изолятор 7 и заготовка 6. Между заготовкой и инструментом 3 пропускается импульсный ток амплитудой 100–200 В. Импульс продолжительностью 20–200 мкс генерируется *RC*-генератором 1.

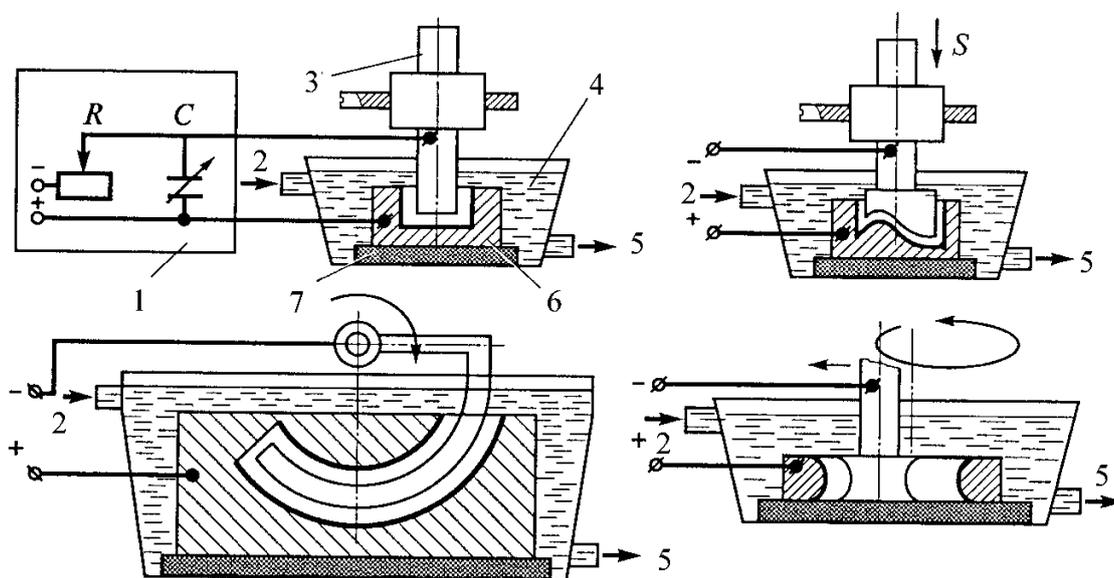


Рис. 11.1. Электроискровая обработка: 1 – *RC*-генератор; 2 – подача электролита; 3 – инструмент; 4 – диэлектрическая жидкость; 5 – слив электролита; 6 – заготовка; 7 – изолятор

Таблица 11.1

Технологические показатели некоторых операций электроискровой обработки (частота 500–5000 Гц)

Операции	Шероховатость Rz, мкм	Производительность, мм ³ /мин	Мощность, кВт	Напряжение, В
Прошивка отверстий диаметром, мм: 1 5 20	0,6–40	До 20	0,2–0,3	30–70
		До 150	0,5–0,8	
		До 1200	2–2,5	
Прошивка фасон-ных полостей	–	4000	20–40	80–200
Гравирование, мар-кирование	–	–	0,5–10	

В зависимости от энергии импульса различают обработку на особо мягких, мягких, средних и жестких режимах. Мягкие режимы позволяют вести обработку с размерной точностью до 2 мкм и шероховатостью обработанной поверхности до Rz 0,32 мкм. Обработка на средних и жестких режимах позволяет получать фасонные открытые полости (полость штампа), цилиндрические отверстия с радиусной осью, прошивать сквозные отверстия любой поперечной формы диаметром 1–50 мм, разрезать заготовку и т. д. Обработка на особо мягких режимах позволяет шлифовать внутреннюю поверхность особо точных отверстий малого диаметра (фильер) и проводить окончательную отделку заготовки.

Электроискровая обработка применяется для изготовления штампов, пресс-форм, фильер, режущего инструмента, деталей топливной аппаратуры двигателей, сеток сит и т. д. Кроме того, электроискровая обработка используется для повышения износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости поверхности деталей машин, стойкости режущего инструмента, для создания шероховатости под последующее гальваническое покрытие, легирования поверхностных слоев, увеличения размеров изношенных деталей.

Сущность электроискрового упрочнения заключена в образовании мелкодисперсной закалочной структуры и в легировании поверхностных слоев материала анода при искровом разряде в воздушной среде. Электроискровому упрочнению подвергают кулачки, фиксаторы, направляющие, прижимы, толкатели, стержни выпускных клапанов, клинья, пазы, шлицы, отверстия.

Электроискровое упрочнение требует предварительной подготовки за-

готовок: удаление загрязнений, заусенцев и пятен коррозии; обеспечение шероховатости обрабатываемой поверхности не более Rz 80 мкм. Электроискровое упрочнение проводят на мягких, средних и жестких режимах (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Характеристика режимов электроискрового упрочнения

Режим	Напряжение, В		Ток, А		Производительность, мм ² /с
	вспомогательного хода	рабочее	короткого замыкания	рабочий	
Мягкий	15	9–13	3,5	0,8–1,2	1,5
	25	10–18	3,7	1,2–1,5	1,3
Средний	40	21–33	4,5	1,5–2,0	1,2
	75	30–48	4,3	2,0–2,5	1,1
Жесткий	135	35–58	4,2	2,0–2,5	1,0
	190	48–68	5,5	2,2–2,8	0,7

Мягкие режимы обеспечивают получение тонкого плотного мелкодисперсного слоя. Жесткие режимы позволяют получать более толстые слои, но не обеспечивают однородность упрочненного слоя.

Электроимпульсная обработка основана на повышенной эрозии анода при подаче импульсов малой и средней продолжительности. При импульсах большой продолжительности (дуговой разряд) значительно быстрее разрушается катод.

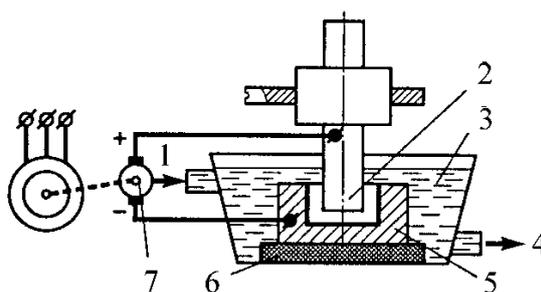


Рис. 11.2. Электроимпульсная обработка: 1 – подача электролита; 2 – инструмент; 3 – диэлектрическая жидкость; 4 – слив электролита; 5 – заготовка; 6 – изолятор; 7 – электромашинный генератор

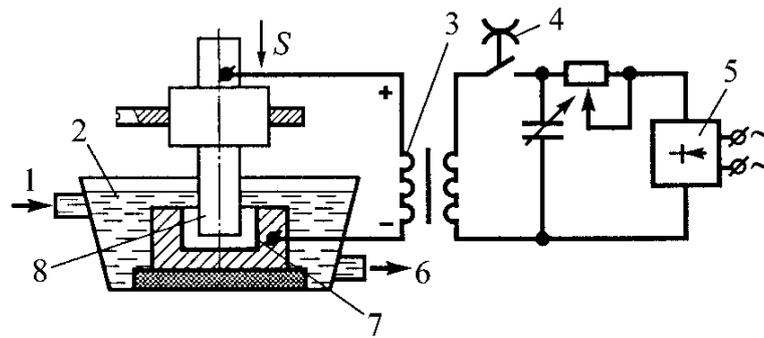


Рис. 11.3. Высокочастотная электроимпульсная обработка: 1 – подача электролита; 2 – диэлектрическая жидкость; 3 – трансформатор; 4 – прерыватель тока; 5 – выпрямитель; 6 – слив электролита; 7 – заготовка; 8 – инструмент

Униполярные импульсы создаются электромашинным 7 (рис. 11.2) или электронным генератором. Продолжительность импульса составляет 500–10000 мкс. Заготовку 5 размещают на изоляторе 6 в ванне с диэлектрической жидкостью 3. При данной обработке инструмент 2 изнашивается медленнее, чем при электроискровой. Значительная мощность импульса обеспечивает высокую производительность, но малую точность обработки, поэтому метод целесообразно применять для черновой обработки обширных полостей, фасонных наружных поверхностей и отверстий.

Высокочастотная электроимпульсная обработка основана на использовании высокочастотных (100–150 кГц) импульсов при малых значениях энергии разряда. Производительность метода в 30–50 раз выше по сравнению с электроискровой обработкой, при одновременном повышении точностных параметров обработанной поверхности.

Схема установки высокочастотной электроимпульсной обработки показана на рис. 11.3. Заготовка 7 и инструмент 8 установлены в ванне с диэлектрической жидкостью 2. Постоянное напряжение от выпрямителя 5 разрывается прерывателем тока 4 и подается на первичную обмотку импульсного трансформатора 3. Включение заготовки и инструмента во вторичную цепь трансформатора позволяет избежать возникновения дугового разряда.

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки 1 (рис. 11.4) в месте ее контакта с инструментом (электродом) 2 и удалении размягченного или расплавленного материала из зоны обработки механическим путем.

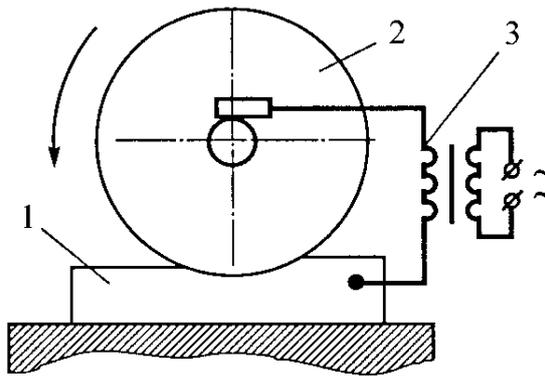


Рис. 11.4. Электроконтактная обработка:
1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – трансформатор

Источником образования теплоты в зоне обработки является импульсный дуговой разряд. Питание электрической цепи производится трансформатором 3 через контактор. Электроконтактную обработку применяют при сверлении, точении, разрезании заготовок.

11.2. Электрохимическая обработка

Метод электрохимической обработки основан на анодном растворении выступов и впадин микронеровностей при электролизе. При прохождении постоянного электрического тока через электролит 2 (рис. 11.5, а) на поверхности анода (заготовки 3) происходят химические реакции и поверхностные слои металла превращаются в химические соединения. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом.

При электрохимическом полировании (рис. 11.5, а) заготовку 3 помещают в ванну 1 с электролитом 2, которым в зависимости от обрабатываемого материала служат растворы кислот или щелочей. Заготовку подключают к аноду. Катод 5 представляет собой пластину из свинца, меди или стали.

При замыкании электрической цепи начинается растворение материала анода – выступов микронеровностей 8 (наибольшая плотность тока – на их вершинах). Продукты растворения 7 (окислы или соли, имеющие пониженную проводимость) заполняют впадины и препятствуют растворению металла. Избирательная скорость растворения по выступам и впадинам сглаживает микронеровности. Обработанная поверхность получает металлический блеск.

Электрохимическое полирование уменьшает глубину микротрещин, не деформирует заготовку, исключает термические изменения структуры и позволяет обрабатывать нежесткие заготовки одновременно по всей поверхности. Чаще всего этот способ применяется для финишной обработки режущих инструментов.

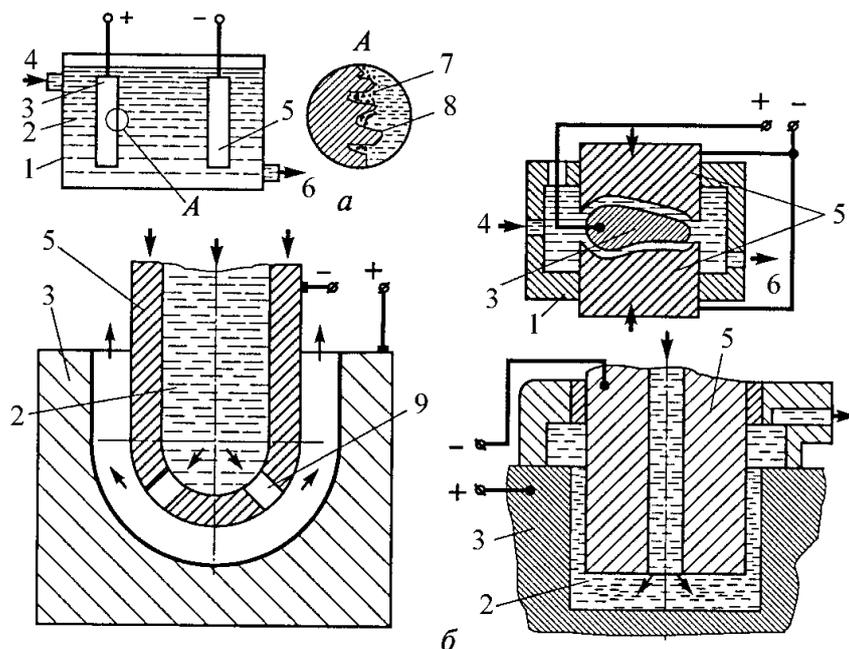


Рис. 11.5. Электрохимическая обработка: *а* – полирование; *б* – размерная обработка; 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – заготовка; 4 – подача электролита; 5 – катод; 6 – слив электролита; 7 – продукты растворения; 8 – микронеровности; 9 – отверстие

Особенностью электрохимической размерной обработки ([рис. 11.5, б](#)) является электролиз в струе электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток, образуемый заготовкой 3 и катодом 5. Струя электролита удаляет и продукты электролиза из рабочей зоны. Способ позволяет одновременно обрабатывать всю поверхность заготовки, находящуюся под воздействием катода (необрабатываемые участки поверхности изолируются).

Электрохимической размерной обработке подвергаются нежесткие заготовки, сложно-фасонные заготовки, фасонные полости или фасонные глухие (сквозные) отверстия в труднообрабатываемых материалах. При обработке полостей или отверстий электролит подается по сквозному или глухому центральному каналу катода через отверстия 9.

Электроабразивная обработка. Особенность электроабразивной обработки состоит в том, что катодом является абразивный инструмент 2 ([рис. 11.6, а](#)), выполненный на электропроводящей связке (например, бакелитовая с графитным наполнителем). Между анодом (заготовкой 1) и инструментом имеется межэлектродный зазор за счет абразивных зерен 3, выступающих из связки. В этот зазор подается электролит 4. До 90 % припуска 5 удаляется за счет анодного растворения, 10–20 % припуска удаляется механической обработкой. При использовании алмазного абразивного инструмента (электроалмазная обработка) анодным растворением удаляется до 75 % припуска. Способ применяется для отделочной обработки нежестких заготовок и заготовок из

труднообрабатываемых материалов.

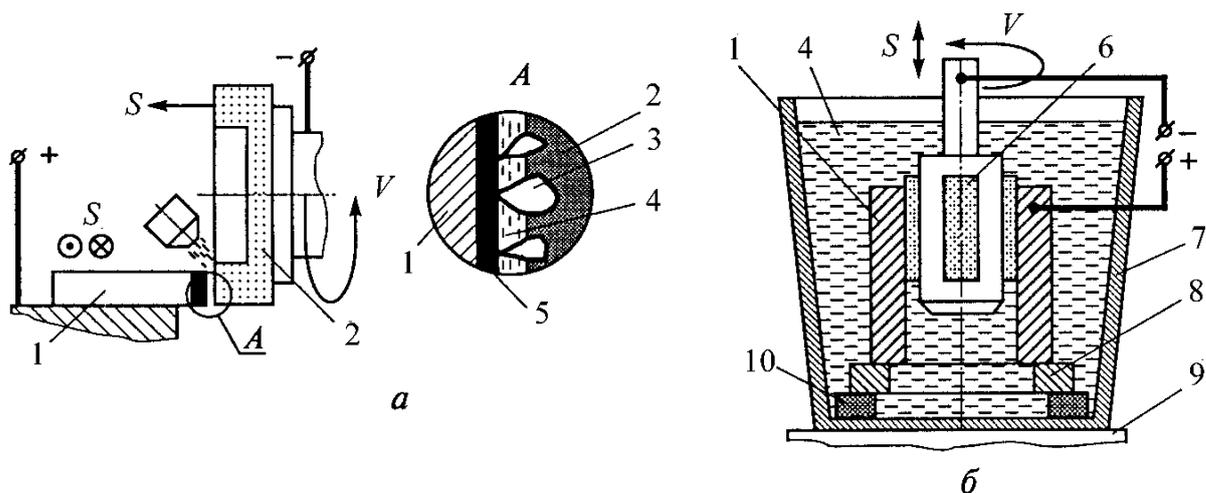


Рис. 11.6. Электроабразивная обработка: *а* – шлифование; *б* – хонингование; 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – абразивные зерна; 4 – электролит; 5 – припуск; 6 – хонинговальная головка; 7 – ванна; 8 – токосъемное кольцо; 9 – стол; 10 – изолятор

При электрохонинговании ([рис. 11.6, б](#)) заготовку 1, установленную на токосъемное кольцо 8 и изолятор 10, помещают в ванну 7 с электролитом 4. Ванну устанавливают на стол 9 хонинговального станка. Кинематика процесса аналогична кинематике обычного хонингования. Однако хонинговальная головка 6 оснащена не абразивными брусками, а брусками из липы, ольхи или пластмассы. Предварительное хонингование ведут в растворе электролита NaNO_3 (натриевая селитра) с добавлением абразивного порошка зернистостью не более M28. Окончательное хонингование ведут в том же электролите, но с добавлением оксида хрома. Способ обеспечивает более низкую шероховатость поверхности ($Ra\ 0,04\text{--}0,16\ \mu\text{м}$ – зеркальный блеск) и повышение производительности обработки в 4–5 раз.

Анодно-механическая обработка основана на комбинированном (механическом, электроэрозионном и электрохимическом) воздействии на материал заготовки. Анод – заготовку 1 ([рис. 11.7, а](#)) и катод – режущий инструмент 3 включают в общую электрическую цепь постоянного тока. В зазор между ними подают электролит 2 (обычно жидкое стекло – водный раствор силиката натрия). Вследствие анодного растворения на заготовке образуется защитная пленка, которая разрушается режущим инструментом. При снятии пленки между выступающими частями электродов происходят электрические разряды, что приводит к электрической эрозии.

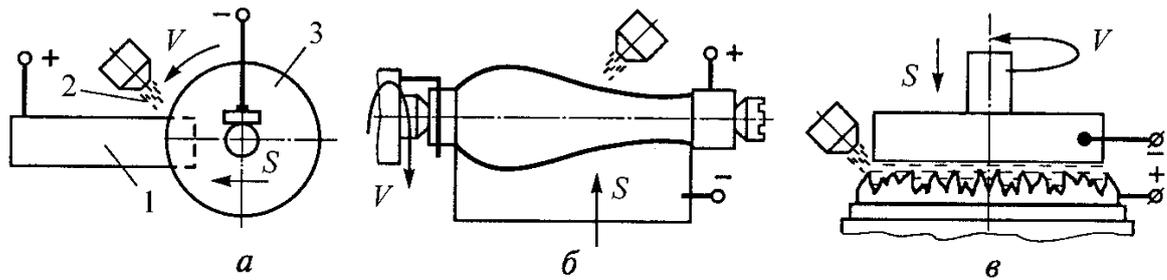


Рис. 11.7. Анодно-механическая обработка:
a – разрезание; *б* – точение; *в* – обработка плоскости;
 1 – заготовка; 2 – электролит; 3 – инструмент

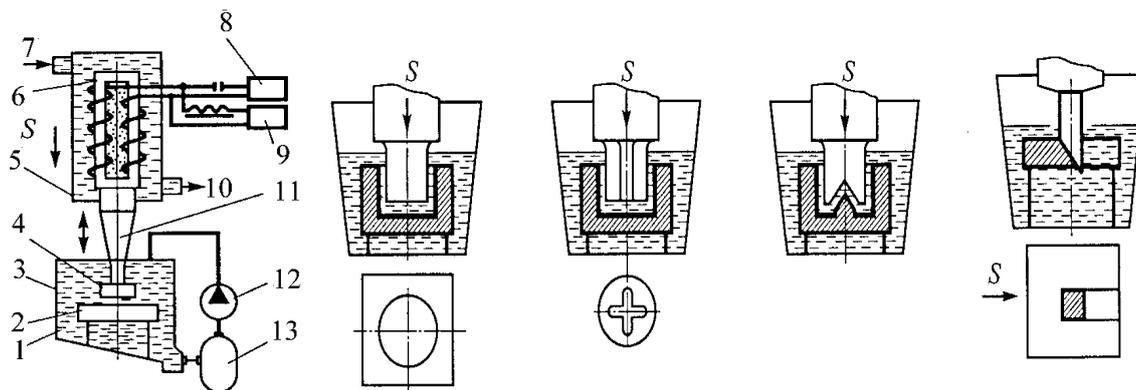
Применение комбинации трех процессов позволяет за счет регулирования энергии отдельных составляющих проводить обработку в широких пределах. При черновой обработке операцию выполняют при большой плотности тока, при этом большое значение имеет тепловое электроэрозионное воздействие, приводящее к интенсивному снятию материала заготовки в результате плавления и взрывообразного испарения металла в среде электролита. Анодное растворение необходимо только для образования защитной пленки, обеспечивающей концентрацию дуговых разрядов на вершинах микронеровностей. Механическое воздействие обеспечивает вынос продуктов разрушения из зоны обработки. Чистовую обработку осуществляют при малой плотности тока. Основное значение имеет механизм анодного растворения и механического разрушения пленки. Эти процессы происходят на вершинах микронеровностей, что позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности и повысить точность обработки.

Анодно-механической обработке подвергаются все токопроводящие материалы, высокопрочные и труднообрабатываемые сплавы, твердые сплавы, вязкие материалы. Анодно-механической обработкой разрезают заготовки (см. [рис. 11.7, а](#)), прорезают пазы и щели, точат ([рис. 11.7, б](#)), обрабатывают плоские поверхности ([рис. 11.7, в](#)), полируют поверхности, затачивают режущий инструмент.

Ультразвуковая обработка. Метод ультразвуковой обработки (УЗО) основан на явлении магнитострикции, т. е. способности сердечника из ферромагнитных материалов изменять свое поперечное сечение и длину под воздействием переменного магнитного поля. Этим эффектом обладают никель, железокобальтовые и железоалюминиевые сплавы, феррит.

Принципиальная схема УЗО представлена на [рис. 11.8, а](#). Заготовку 2 помещают в ванну 3, заполненную абразивной суспензией 1. К заготовке подводят инструмент – пуансон 4, закрепленный на торце концентратора 11, который расположен в магнитострикционном сердечнике 6, установленном в кожухе 5. Через кожух пропускают охлаждающую жидкость. Колебания сердечника возбуждаются с помощью генератора ультразвуковой частоты 8 (частота – 16–30 кГц, амплитуда колебаний – 5–10 мкм) и источника

постоянного тока 9. Абразивную суспензию прокачивают через систему «ванна 3 – резервуар 13 – насос 12».



а б

Рис. 11.8. Ультразвуковая обработка: а – схема установки: 1 – суспензия; 2 – заготовка; 3 – ванна; 4 – пуансон; 5 – кожух; 6 – сердечник; 7 – подача охлаждающей жидкости; 8 – генератор; 9 – источник постоянного тока; 10 – слив охлаждающей жидкости; 11 – концентратор; 12 – насос; 13 – резервуар; б – примеры обработки

Концентратор 11 увеличивает амплитуду колебаний до 40–60 мкм. Колебательные движения инструмента передаются абразивным зернам суспензии. В результате соударений об обрабатываемую поверхность абразивные зерна скалывают микрочастички материала заготовки. Большое число соударений (до 30 000 в секунду) и кавитация обуславливают интенсивное разрушение поверхностного слоя заготовки.

Ультразвуковая обработка применяется для обработки сквозных и глухих отверстий различного поперечного сечения, фасонных полостей, для резания заготовок и т. п. (рис. 11.8, б). При помощи УЗО обрабатывают хрупкие твердые материалы: стекло, керамику, твердые сплавы, кремний, кварц, алмазы, а также цементированные, азотированные и закаленные стали.

Лазерная обработка относится к светолучевым методам упрочнения или снятия поверхностных слоев заготовки и основана на воздействии светового луча высококонцентрированной энергии на поверхность заготовки. Источником светового излучения является оптический квантовый генератор (ОКГ) – лазер, принципом работы которого является индуцированное генерирование светового излучения.

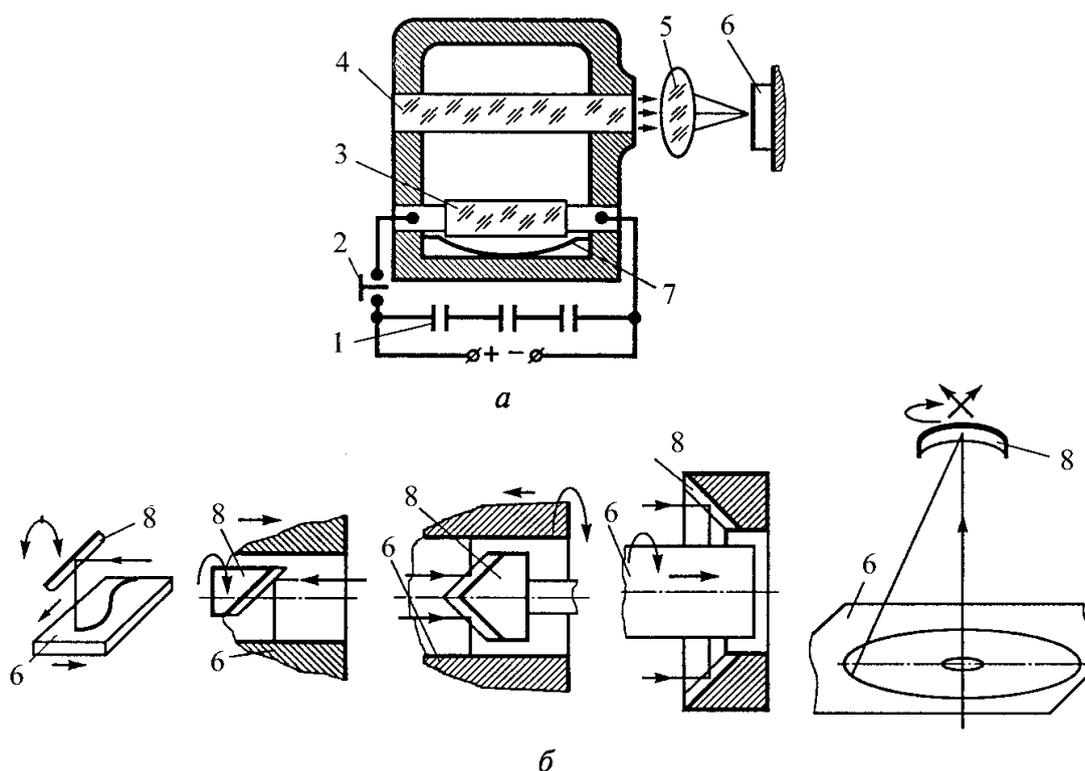


Рис. 11.9. Лазерная обработка: *a* – схема рубинового лазера; *б* – схемы управления лучом; 1 – батарея конденсаторов; 2 – пускатель; 3 – ксеноновая импульсная лампа; 4 – рубиновый стержень; 5 – оптическая система; 6 – заготовка; 7 – отражатель; 8 – зеркало

Атомы вещества имеют определенный запас энергии и находятся в устойчивом энергетическом состоянии. Если атому дать дополнительную энергию («накачка», или возбуждение, атома), он выйдет из равновесного состояния. Атом стремится вернуться в устойчивое энергетическое состояние, выделяя квант энергии. Накачку активного вещества осуществляют импульсной лампой. Возбужденный атом, получив дополнительный фотон, излучает два фотона, возвращаясь в устойчивое энергетическое состояние. В результате происходит цепная реакция генерации светового излучения.

Для механической и упрочняющей обработки используют твердотельные ОКГ, рабочим элементом которых является синтетический рубиновый стержень (оксид алюминия, активированный 0,05 % хрома). Рубиновые лазеры (рис. 11.9, *a*) генерируют импульсы когерентного монохроматического красного света. Рубиновый стержень 4, торцы которого строго параллельны друг другу и перпендикулярны его оси, установлен в корпусе лазера. Левый торец покрыт непрозрачным слоем серебра, правый – полупрозрачным (коэффициент светопропускания 8 %). Источником возбуждения атомов хрома является ксеноновая импульсная лампа 3, подключенная к батарее конденсаторов 1 и включаемая пускателем 2. При включении пускового устройства энергия конденсаторов преобразуется в световую энергию импульсной лампы, световой поток которой фокусируется на рубиновом стержне отражателем 7, в результате чего атомы хрома возбуждаются. Излучаемый возбужденными атомами хрома лавинообразный поток фотонов

длиной волны 0,69 мкм многократно отражается от зеркальных торцевых поверхностей рубинового стержня и, проходя через полупрозрачный правый торец, фокусируется оптической системой 5 на заготовке 6. Энергия единичного импульса невелика, но она выделяется за 10^{-6} с на площади $0,01 \text{ мм}^2$, поэтому в фокусе луча обеспечивается температура $6000\text{--}8000 \text{ }^\circ\text{C}$. В месте попадания луча (на поверхности заготовки) металл моментально нагревается и испаряется.

Лазерную обработку применяют для прошивания сквозных и глухих отверстий, разрезания заготовок, фасонной резки листового металла, прорезания пазов, термической обработки поверхности заготовки ([рис. 11.9, б](#)).

Лазерная закалка применяется в тех случаях, когда закалка другими способами затруднительна. Поверхностное упрочнение лазером характеризуется следующими особенностями:

- упрочнение локальных по глубине и площади участков;
- локальное упрочнение полостей, недоступных обычным методам закалки;
- отсутствие коробления заготовки;
- получение при необходимости заданной микрошероховатости обработанной поверхности;
- возможность легирования поверхностного слоя;
- простота автоматизации процесса.

Упрочнению подвергаются углеродистые, малоуглеродистые, легированные и высоколегированные стали: У8А; У10А; 45; ХВГ; 9ХС; Х12; ШХ15; Р18; Р6М5К5Ф3 и др.

Лазерная закалка основана на местном нагреве поверхности до температур, лежащих в зоне «фазовые превращения – плавление», и высокоскоростном охлаждении поверхности за счет отвода теплоты к сердцевине заготовки. В результате образуется мелкозернистый мартенсит и остаточный аустенит. Глубина упрочнения – до 0,2 мм. Средняя производительность упрочнения: в атмосфере аргона – до $500 \text{ мм}^2/\text{мин}$ (закалка в атмосфере аргона предохраняет зону обработки от обезуглероживания); на воздухе – до $800 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

Глубина упрочненного слоя, мм:

$$Z = \sqrt{at},$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{мм}^2/\text{с}$; τ – длительность импульса лазерного воздействия, с.

Режимы лазерной закалки приведены в [табл. 11.3](#).

В отечественном машиностроении для лазерной закалки наиболее часто используется установка «Квант-16». Схемы управления перемещением лазерного луча представлены на [рис. 11.9, б](#).

Ответственные детали, работающие в условиях повышенного давления с малой площадью контакта (клапаны, седла клапанов, распределители),

изготавливаются из высокохромистых аустенитных сталей (1X17H2, X18H10T) с наплавкой стеллита, которую ведут дуговым, кислородно-ацетиленовым или аргонодуговым методами. Структура стеллита представляет собой твердый раствор на основе кобальта на фоне эвтектики. Его химический состав: углерод – 1,6–2,3 %; кремний – 1,5–2,5 %; хром – 26–32 %; кобальт – 59–65 %; вольфрам – 4–5 %; остальное – железо.

Таблица 11.3

Режимы лазерной закалки

Сталь	Диаметр пятна закалки, мм					Повышение твердости, %
	2	3	3,8	4	4,5	
	$E, \text{ Дж/см}^2 (Z, \text{ мкм})$					
У8	9 (108)	23 (117)	31 (126)	41 (132)	54 (136)	51
ХВГ	8 (103)	22 (114)	30 (121)	39 (127)	51 (131)	33
9ХС	8 (98)	21 (112)	29 (117)	37 (124)	49 (129)	44
Х12М	7,5 (91)	20 (103)	28 (112)	35 (115)	46 (119)	22
Р6М5	7 (82)	18 (91)	26 (103)	32 (107)	43 (113)	10

Примечание. E – плотность энергии лазерного излучения; Z – глубина упрочненного слоя.

Различие в коэффициентах линейного расширения исключает обычные виды термообработки. Локальность нагрева поверхности заготовки лазером позволяет упрочнять стеллит. Упрочненная зона образуется последовательными пятнами фокусированного лазерного облучения с перекрытием 0,75 диаметра пятна шириной 0,6 мм.

Оптимальные режимы упрочнения стеллита: напряжение накачки – 980 В; удельная энергия импульса – 8 Дж/см²; длительность импульса – 4 мс; количество импульсов в фокальном пятне – 1–8; фокусное расстояние оптической системы – 37 мм; диаметр зоны проплавления – 0,4–0,6 мм.

Лазерное упрочнение приводит к повышению твердости до 49–50 HRC, глубина упрочненного слоя составляет 0,12–0,16 мм.

Плазменно-лучевая обработка (ПЛО) заключается в воздействии направленного потока ионизированных частиц газа, имеющих температуру до 20 000 °С (плазмы), на обрабатываемую поверхность. Поток плазмы можно разрезать и сваривать различные сплавы, наплавлять на заготовку различные покрытия.

Плазменные горелки для резания питаются от стандартных сварочных источников тока. Сопло и электродную камеру выпускают двух типов: с дросселирующим воздушно-водяным охлаждением – для работы при силе тока 300–500 А и с комбинированным дросселирующим и водяным охлажде-

нием – для работы при силе тока 700–800 А. Головки первого типа (рис. 11.10) имеют стеклотекстолитовый или фарфоровый корпус. Воздушно-водяная смесь дросселируется в камеру расширения, расположенную в верхней и нижней частях горелки, между крышкой 3 и наконечником 1. Обе части сообщаются через отверстие в корпусе 2. Ток от дросселя 5 подводится к цанге электрододержателя 4, верхний торец которого охлаждается переохлажденной воздушно-водяной смесью. Защитный газ (аргон или диссоциированный аммиак) подается в герметичную электродную камеру 6, установленную на нижнем торце корпуса соосно электроду. Анод – сопла 7 ввинчивается в центральное отверстие электродной камеры. Головки второго типа выполняются с фарфоровым корпусом. Токопровод к аноду впаивается в дополнительный водоотводящий шланг, который одновременно служит активным сопротивлением в цепи вспомогательной дуги и ограничивает силу тока до 60–90 А.

Высокая температура и скорость плазменной струи обеспечивают получение тепловой энергии высокой концентрации, поэтому ПЛО имеет высокую производительность резания любых материалов при относительно высокой шероховатости обработанной поверхности. Для обработки заготовок применяются головки как с выделенной, так и с совпадающей дугой. Первые более удобны для металлорежущих станков, но эффективность их ниже.

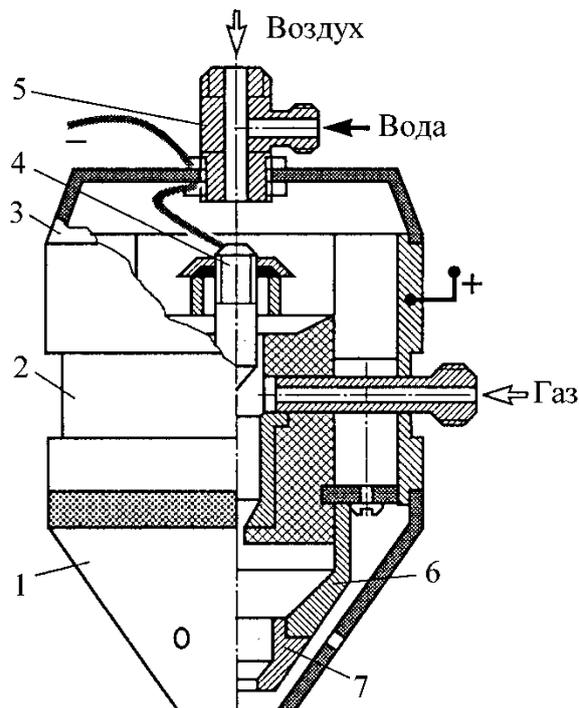


Рис. 11.10. Плазменная горелка с дросселирующим воздушно-водяным охлаждением:

1 – наконечник; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – цанга электрододержателя; 5 – дроссель; 6 – электродная камера; 7 – сопло

Таблица 11.4

Режимы плазменного резания

Обрабатываемый материал	Толщина листа, мм	Газ, %		Расход газа, л/мин	Электрический режим			Скорость резания, м/ч
		Ar	N или H		I, A	U, B	N, кВт	
Сталь	10	20	80	37	350	90	31	80
	50			200		140	49	15
	120			750		180	63	4
Медные сплавы	19	20	80	50	400	90	36	60
	40			300		110	52	10
	80			600		160	64	5
Алюминиевые сплавы	10	50	50	7	300	80	24	450
	50			86		130	39	35
	150			875		180	54	4

Плазменная лучевая обработка применяется как самостоятельная операция (резание заготовок, раскрой листового материала, прошивка отверстий) или выполняется совместно с точением, строганием, шлифованием (плазменно-механическая обработка).

Наиболее часто ПЛО применяется для резания листового материала. Горелки с выделенной дугой используют для резания тонколистовых металлов и неэлектропроводных материалов. Горелки с совпадающей дугой применяют для резания толстолистовых металлов (листы из алюминиевых сплавов толщиной до 125 мм, стальные – до 100 мм). Скорость резания зависит от толщины листа ([табл. 11.4](#)).

Плазменно-механическая обработка (ПМО) заключается в использовании плазменной дуги для создания очага высокой концентрации теплоты, локализованной в зоне резания непосредственно перед режущей кромкой. Высокая эффективность ПМО достигается при строгом согласовании воздействий плазменной струи, осуществляемых последовательно с задержкой по времени в несколько долей секунды, и режущего инструмента на обрабатываемую поверхность.

Режимы дуги и резания подбирают таким образом, чтобы глубина зоны интенсивного нагрева l ([рис. 11.11](#)) соответствовала толщине срезаемого слоя, а температура материала, формирующего поверхностный слой заготовки, оставалась существенно ниже температуры начала структурных превращений. Плазменную горелку (плазмотрон) располагают таким образом, чтобы анодное пятно контакта 3 дуги постоянно находилось в заданной точке (центральная точка нагрева 2). Положение пятна контакта 3 определяют два параметра: расстояние L (величина запаздывания

механического воздействия) и угол наклона плазмотрона ψ . Величина L определяется скоростью резания. Если скорость резания мала, а L велико, то к моменту подхода нагретого слоя к режущему клину слой успеет остыть. Если скорость резания большая, а L мало, то срезаемый слой не успеет прогреться на заданную глубину.

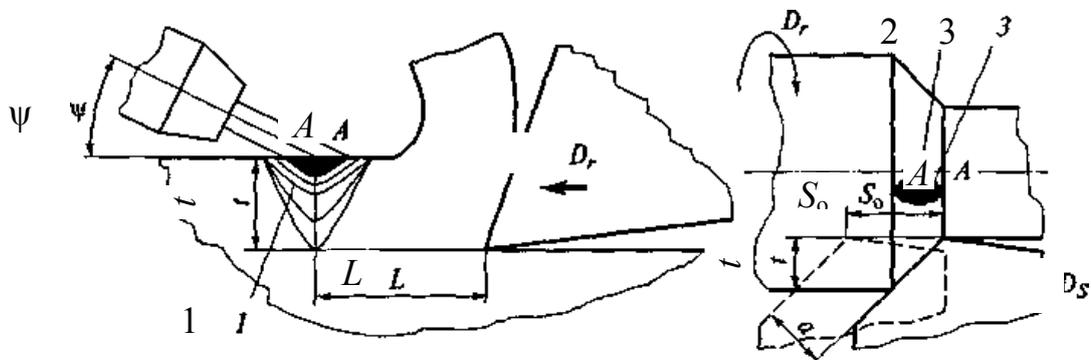


Рис. 11.11. Плазменно-механическая обработка: 1 – зона интенсивного нагрева; 2 – центральная точка нагрева; 3 – анодное пятно контакта; a – толщина срезаемого слоя; L – величина запаздывания механического воздействия; t – глубина резания; ψ – угол наклона плазмотрона

Таблица 11.5

Режимы ПМО при точении

Обрабатываемый материал	Операция	I, A	U, B	$V, м/мин$	$S_o, мм/об$	Производительность, $см^2/мин$
Сталь коррозионно-стойкая	Черновая	300	90	1,5	4,0	73,2
	Чистовая	170	92	6,1	1,0	32,5
Сталь жаропрочная	Черновая	325	95	1,6	4,0	81,5
	Чистовая	240	90	3,2	2,0	32,5
Никелевые сплавы	Черновая	300	100	1,2	4,0	40,7
	Чистовая	170	90	2,3	1,2	24,4
Жаропрочные сплавы	Черновая	200	100	0,9	2,5	57
	Чистовая	140	130	1,8	1,2	24,4

Одной из особенностей ПМО является образование лунки на обрабатываемой поверхности. Металл из лунки выдувается потоком плазмы, при этом увеличивается глубина и площадь прогрева материала заготовки, поэтому угол ψ должен быть как можно меньше. В то же время он должен быть таким, чтобы выдуваемый металл выбрасывался на обрабатываемую поверхность или на стружку, а не на обработанную поверхность или

переднюю поверхность режущего инструмента.

При ПМО получается сливная стружка кинжальной формы, опасная для станочника. Поднимаясь вверх, стружка может замкнуть сопло плазмотрона, поэтому у режущего инструмента необходимо предусматривать стружколомные канавки.

Каждая установка ПМО должна быть обеспечена системой местной вентиляции, поскольку при обработке выделяются вредные для здоровья человека мельчайшие частицы оксидов металлов и других соединений.

Плазменно-механическая обработка применяется для резания трудно-обрабатываемых материалов: высокохромистых сталей, никелевых и кобальтовых сплавов, жаропрочных и закаленных сталей. Типовые режимы ПМО для точения приведены в [табл. 11.5](#).

ГЛАВА 12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

12.1. Наплавка и газотермическое нанесение покрытий

Наплавка. Сущность процесса наплавки заключается в получении поверхностных слоев нанесением расплавленного присадочного материала методом сварки (рис. 12.1). Проплавление основного металла, перемешивание основного и наплавленного металлов должны быть минимальными для сохранения механических свойств наплавляемого слоя.

Материалы, применяемые для наплавочных работ, можно разделить на следующие группы:

- сплавы на основе железа (стали, высокохромистые чугуны и др.);
- сплавы на основе никеля и кобальта;
- сплавы на основе меди;
- карбидные сплавы (с карбидом вольфрама или хрома) и др.

Наплавку применяют для восстановления изношенных изделий и создания поверхностей с необходимыми свойствами при изготовлении новых изделий. Масса наплавленного слоя обычно не превышает нескольких процентов от общей массы заготовки. При затвердевании расплавленного металла рост кристаллитов в наплавленном слое происходит на базе частично оплавленных зерен основного металла.

Наиболее широкое распространение в промышленности получила дуговая наплавка покрытым электродом, порошковой проволокой, в среде защитных газов, под флюсом и др. Электрошлаковую наплавку применяют при необходимости наплавить большое количество металла, лазерная наплавка обеспечивает локальность теплового воздействия, минимальное перемешивание наплавленного и основного металлов, а также практическое отсутствие деформации изделия после наплавки.

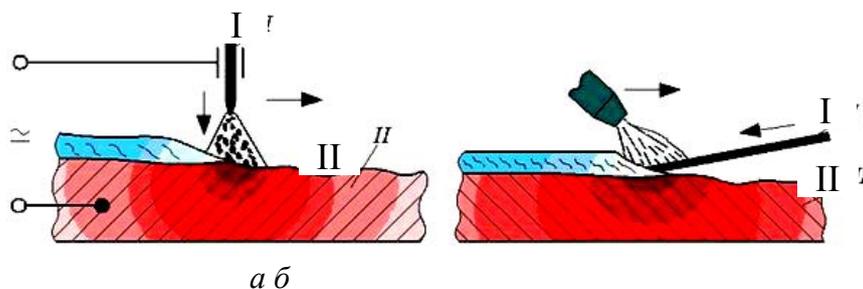


Рис. 12.1. Схема дуговой наплавки: *а* – покрытым электродом; *б* – порошковой проволокой; I – материал покрытия; II – изделие

12.1. Наплавка и газотермическое нанесение покрытий

При проведении работ по наплавке следует иметь в виду, что в поверхностных слоях наплавленного металла возникают остаточные, как правило, растягивающие напряжения. В результате этого возможно не только искажение формы и размеров заготовок, но и появление трещин в наплавленном слое.

Газотермическое нанесение покрытий. Сущность процессов газотермического нанесения покрытий заключается в образовании наплавленного потока дискретных частиц размером от 10 до 200 мкм (рис. 12.2). Для образования прочных связей между частицами в покрытии необходимо обеспечить достаточный уровень активации при их контактировании с поверхностью, которая, как правило, не оплавляется. Это достигается нагревом и ускорением частиц в процессе переноса.

В зависимости от источника теплоты и движущих сил переноса различают следующие способы напыления: газопламенное, плазменное, детонационное, дуговая металлизация и высокочастотная металлизация.

В газопламенных процессах для нанесения покрытий используют теплоту, выделяющуюся при сгорании горючих газов в смеси с кислородом или сжатым воздухом. Для создания потока частиц основными видами материалов, используемых при газопламенном напылении, является порошок и проволока (рис. 12.2). В качестве горючего газа применяют ацетилен, пропан или водород, при сгорании которых в кислороде при выходе из сопла развивается температура 2500 °С, скорость движения частиц достигает 120 м/с, а производительность возрастает до 8 кг/ч (для стали) и 30 кг/ч (для цинка).

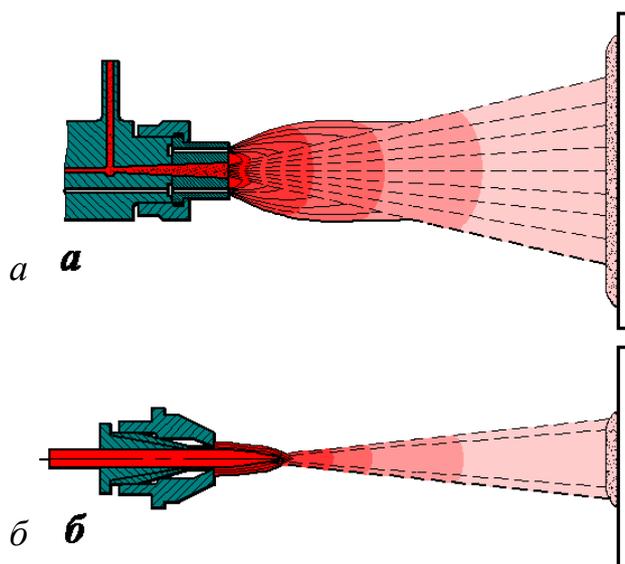


Рис. 12.2. Схема газопламенного нанесения покрытий:
а — порошком; б — проволокой

При плазменном напылении применяют в основном струи, получаемые в дуговых плазмотронах, в которых источником нагрева является дуга,

12.1. Наплавка и газотермическое нанесение покрытий

горящая между водоохлаждающими электродами. В качестве плазмообразующих газов применяют аргон, водород, азот, аммиак, гелий, воздух и др. Частицы порошка, попадая в плазменную струю, расплавляются и переносятся на поверхность обрабатываемого изделия.

При детонационном напылении источник нагрева представляет собой высокоскоростной поток газовой смеси, образующийся в результате направленного взрыва, обусловленного детонацией. Скорость продуктов детонации определяет скорость напыляемых частиц, которая обычно составляет 800–1200 м/с.

При электродуговом напылении образование потока наплавляемых частиц происходит в результате плавления материала высокоамперной дугой. Особенностью горения дуги в электрометаллизаторе является воздействие мощного скоростного потока распыляющего газа, в результате чего происходит сжатие дуги, температура которой достигает 4000 °С.

Процесс высокочастотного напыления основан на использовании токов высокой частоты. Помещенный в индуктор стержень (проволока) расплавляется вихревыми токами, возникающими под действием переменного магнитного поля, образующегося при прохождении высокочастотного тока по катушке. Расплавленный металл распыляют струей сжатого воздуха и наносят на обрабатываемую поверхность. При напылении металлов, активно взаимодействующих с кислородом, используют инертные газы.

Газотермическое нанесение покрытий может осуществляться как при атмосферном, так и при пониженном или повышенном давлении. Размер частиц наплавляемого материала существенно влияет на структуру и свойства покрытия. С увеличением размера частиц повышается плотность и однородность покрытия. Частицы размером менее 10 мкм становятся непригодными для напыления на воздухе, так как они не достигают поверхности изделия, поскольку увлекаются потоком газа, обтекающим изделие.

Различные способы газотермического напыления применяют для получения коррозионно-стойких, износостойких, жаростойких и других покрытий из алюминия, цинка, сталей, бронзы, карбидов вольфрама, керамики. Размеры и форма изделий при этом методе не ограничены, а толщина покрытия может составлять от 0,1 до 2 мм. Для получения прочного соединения покрытия с поверхностью заготовки необходима ее специальная подготовка. Перед нанесением металла толщиной до 1 мм поверхность обдувают корундом для очищения, придания необходимой шероховатости и активации. Если напыляют более толстые слои, то шероховатость обеспечивают черновым точением или фрезерованием канавок типа «ласточкин хвост».

Преимуществом газотермического нанесения покрытий является возможность применения широкого спектра материалов и проведение процесса как в атмосфере, так и в защитных камерах. Недостатками являются высокая стоимость процесса, относительно низкая производительность, высокий уровень шума.

12.1. Наплавка и газотермическое нанесение покрытий

Нанесение покрытий в жидкой фазе осуществляют также погружением в расплавленные среды, электролитическим осаждением металлов и химической обработкой (нанесение покрытий и поверхностное легирование).

12.2. Виды химико-термической обработки

Методами химико-термической обработки металлов достигается изменение свойств поверхности, обеспечивается поверхностное упрочнение металлов и сплавов (повышение поверхностной твердости, износостойкости, усталостной прочности, теплостойкости и т. д.), а также повышение стойкости металлов и сплавов против воздействия внешних агрессивных сред при нормальных и повышенных температурах (коррозионной стойкости в атмосферных условиях, стойкости к кавитационной эрозии, кислотостойкости, жаростойкости, окислительной стойкости и т. д.).

Из методов химико-термической обработки наиболее распространены методы насыщения поверхности металлических изделий неметаллами. Такими неметаллами являются углерод, азот, бор, сера. Поэтому способы химико-термической обработки металлов и сплавов получили следующие названия: науглероживание (цементация), азотирование, борирование, сульфидирование. Насыщение может проводиться одним неметаллом, комплексно двумя или тремя неметаллами.

Насыщение металлами включает следующие процессы: алитирование (насыщение алюминием), хромирование (диффузионное насыщение хромом), силицирование (насыщение поверхности кремнием).

Насыщение проводят путем нагрева обрабатываемых изделий в химически активной среде, содержащей насыщающий компонент. В результате нагрева во внешней среде образуется насыщающий элемент в атомарной форме, он адсорбируется насыщаемой поверхностью и диффундирует в глубь изделия, приводя к его упрочнению.

12.2.1. Цементация стали

Цементации обычно подвергают углеродистые и легированные стали с малым содержанием углерода (как правило, не более 0,20–0,25 %). После цементации и окончательной термической обработки обеспечивается получение поверхностной твердости 56–64 HRC при сохранении вязкой сердцевины (рис. 12.3), что определяет высокую конструктивную прочность изделий, благоприятное сочетание износостойкости поверхности с высокой сопротивляемостью динамическим разрушениям.

12.2. Виды химико-термической обработки

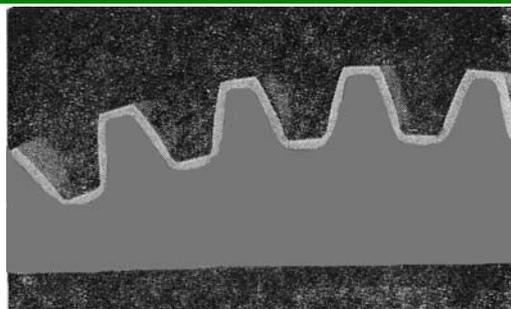


Рис. 12.3. Толщина цементованного слоя зубчатого колеса

Цементацию проводят в твердом карбюризаторе, в газовых средах и иногда в расплавах солей (жидкостная цементация).

Поверхностный слой после цементации еще не обладает высокой твердостью и износостойкостью. Для создания этих качеств требуется окончательная термическая обработка (закалка и отпуск).

12.2.2. Азотирование стали

Азотирование – поверхностное насыщение стали азотом применяется, как и цементация, преимущественно для повышения поверхностной твердости, износостойкости деталей машин и механизмов.

Азотирование ведут путем нагрева заготовок в газовой среде аммиака, который под воздействием температур процесса разлагается и таким образом обеспечивает насыщение поверхности заготовок азотом.

Кроме того, азотирование обеспечивает повышение коррозионной стойкости материала, а также теплостойкость упрочненного поверхностного слоя. Характер упрочнения в результате азотирования принципиально иной по сравнению с цементацией. Высокая твердость и износостойкость слоя достигается при образовании сплошной зоны нитридов легирующих элементов, содержащихся в стали на внешней поверхности изделия.

Для повышения коррозионной стойкости азотированию подвергают углеродистые стали. Для повышения поверхностной твердости и износостойкости используют комплексно-легированные стали, содержащие хром, молибден, алюминий и другие компоненты, например 30ХМЮА, 38ХЮА, 34ХН1М и др. Азотированию подвергают наиболее ответственные детали: гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания, шестерни, детали топливной аппаратуры. Азотирование также проводят для нержавеющей сталей ферритного или аустенитного класса: 30Х13, 40Х13, 40Х14Н14В2М и др.

Изделия после азотирования без дополнительной термической и механической обработки сразу подаются на сборку. Размеры изделий при азотировании не изменяются, поэтому азотированию подвергаются готовые детали без припусков на окончательную механическую обработку. В связи с этим свойства, которыми должна обладать сердцевина изделия, должны быть сформированы до азотирования. Поэтому заготовки для изготовления

азотируемых деталей подвергают предварительной термической обработке (улучшению), включающей закалку и высокотемпературный отпуск.

12.2.3. Методы совместного насыщения азотом и углеродом

Совместное насыщение поверхности деталей азотом и углеродом предусматривает возможность реализации принципиально различающихся способов в зависимости от того, какой из этих элементов является основным, а какой – дополнительным. В соответствии с этим различают цианирование и нитроцементацию. Цианирование ведут в жидких средах – расплавах солей, а нитроцементацию – в газовой среде.

Цианирование и нитроцементация обеспечивают получение слоя, аналогичного получаемому при цементации. Азот увеличивает прочностные свойства слоя, его износостойкость. Основное применение низкотемпературного цианирования – дополнительное упрочнение режущего и штампового инструмента, изготовленного из быстрорежущих и других теплостойких сталей. Инструменты после окончательной термической обработки на максимальную твердость и после шлифовки и заточки насыщают углеродом и азотом, при этом формируется тонкий (0,04–0,09 мм) карбонитридный слой высокой твердости и износостойкости, увеличивающий режущую стойкость инструмента в 1,5–2,0 раза. Термообработки после насыщения, как и после азотирования, не требуется.

12.2.4. Насыщение металлами

Металлами можно насыщать стали и чугуны, алюминиевые и медные сплавы, а также многие другие металлические или керамические материалы.

К настоящему времени созданы следующие технологически различающиеся группы процессов, способных обеспечить создание диффузионных покрытий металлами:

- насыщение в порошковых твердых смесях;
- диффузионное насыщение из газовой фазы циркуляционным методом;
- погружение в металлические расплавы;
- диффузионный отжиг изделий с ранее нанесенной различными методами тонкой пленкой насыщающего вещества;
- диффузионное удаление из поверхности компонентов сплава путем нагрева его в вакууме либо иной контролируемой среде.

Наибольшее распространение имеют процессы насыщения в порошковых твердых смесях. Для их проведения насыщаемые изделия упаковывают в порошковые смеси в герметичных стальных ящиках аналогично цементации.

В качестве примеров насыщения металлами рассмотрим процессы алитирования, силицирования и диффузионного хромирования.

12.2. Виды химико-термической обработки

Алитувание применяется с целью повышения стойкости к атмосферной коррозии, особенно при повышенных температурах, и, следовательно, для повышения жаростойкости и окислостойкости стали, меди и медных сплавов. Для алитования стали используют порошкообразный ферроалюминий (49 %), окись алюминия (49 %) и хлористый аммоний (2 %). В результате алитования образуется слой глубиной от 0,15 до 0,50 мм.

Силицирование – процесс насыщения поверхности стали кремнием применяется с целью повышения кислотостойкости поверхности, например, стальных емкостей для перевозки концентрированных кислот, за исключением плавиковой. В состав порошковой твердой среды вводят 60 % ферросилиция, 39 % глинозема (окиси алюминия) и 1 % хлористого аммония. Глубина формирующегося слоя – от 0,3 до 1 мм. В таком состоянии силицированный слой обладает высокой устойчивостью к коррозии в морской воде, а также в азотной, серной и соляной кислотах.

Диффузионное хромирование ведут для повышения поверхностной твердости, износостойкости деталей из стали и чугуна при одновременном увеличении коррозионной и кислотостойкости поверхности. Для хромирования используют металлический порошок хрома или феррохрома в количестве 50 % от состава смеси, 47 % окиси алюминия и 3 % хлористого аммония. Образующийся слой глубиной от 0,02 до 0,12 мм обладает высокой твердостью, что обеспечивает высокую износостойкость поверхности детали.

ГЛАВА 13. ОСНОВЫ СБОРОЧНЫХ РАБОТ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

13.1. Машина и ее служебное назначение

Под *служебным назначением машины* понимают максимально уточненную и четко сформулированную задачу, для решения которой предназначена машина. Формулировка служебного назначения должна отражать не только общую задачу, для решения которой создается машина, но и все дополнительные условия и требования, которые эту задачу количественно уточняют и конкретизируют.

Важнейшими характеристиками при оценке машин являются: надежность, работоспособность, производительность, экономическая эффективность, металлоемкость, энергоемкость, степень автоматизации, простота и безопасность обслуживания, удобство управления сборки и разборки.

Надежность (по ГОСТ 27.002–89) – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Надежность в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать такие показатели, как отказ, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и работоспособность, в отдельности или в их определенном сочетании.

Надежность деталей машин, механизмов и приборов во многом зависит от того, насколько близки предельные запасы основных расчетных критериев работоспособности (прочность, скорость, температура, износостойкость и др.) к действительным рабочим режимам. Когда специалисты говорят о надежности конкретного объекта, они должны ясно представлять, о каких свойствах идет речь для данного объекта. Надежность не может быть общей для всех видов техники. Она всегда конкретна, особенно в отношении численных значений показателей частных свойств надежности.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности машины (полной или частичной). По своей природе отказы бывают: полные и частичные; внезапные (например, поломка) и постепенные (изнашивание, коррозия); опасные для жизни человека; тяжелые и легкие, устранимые и неустраиваемые. В зависимости от причин возникновения отказы подразделяются на конструкционные, производственные и эксплуатационные.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Долговечность (ресурс) – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Работоспособность – состояние изделия (привода, узла, детали, машины), при котором оно способно нормально выполнять заданные функции в соответствии с параметрами, установленными нормативно-технической документацией.

Основными критериями работоспособности машин являются: прочность, жесткость, износостойкость, виброустойчивость, теплостойкость и стойкость против коррозии и старения. Эти критерии обеспечивают безотказное функционирование машины в пределах заданного ресурса.

Так как любая машина предназначена для выполнения какого-либо процесса, полезного человеку, изучение ее служебного назначения следует начинать с ознакомления с намечаемыми результатами. Например, если в результате должна быть получена продукция надлежащего качества, то формулировка служебного назначения производящей машины должна содержать сведения о виде, качестве и количестве продукции.

Другую группу данных по служебному назначению машины могут составлять показатели производительности, которой должна обладать машина. Формулировка служебного назначения машины должна включать перечень условий, в которых ей предстоит работать и производить продукцию требуемого качества и в необходимых количествах.

Условия работы таких машин вытекают из описания технологического процесса изготовления продукции и включают комплекс показателей с допускаемыми отклонениями, характеризующими качество исходного продукта, количество потребляемой энергии, режимы работы машины и состояние окружающей среды.

Формулировка служебного назначения машины может содержать также ряд дополнительных сведений, которые необходимо учитывать при ее проектировании и изготовлении (например, требования к внешнему виду, безопасности работы, удобству и простоте обслуживания и управления, уровню шума, КПД, степени механизации и автоматизации).

Опыт показывает, что каждая ошибка, допущенная при выявлении и уточнении служебного назначения машины, а также ее механизмов, приводит не только к созданию недостаточно качественной машины, но и к лишним затратам труда на ее изготовление и эксплуатацию, а также к увеличению сроков ее освоения. Нередки случаи, когда недостаточно глубокое изучение и выявление служебного назначения машины порождает излишне жесткие, экономически не оправданные требования к точности и другим показателям качества машины.

Первоначально служебное назначение машины формулируется заказчиком и уточняется при оформлении заказа на проектирование. Для кон-

структура формулировка служебного назначения машины является исходным документом, который впоследствии он прилагает к чертежам машины. От технолога, приступающего к разработке технологии изготовления машины и являющегося лицом, ответственным за сдачу готовой машины, требуется изучение служебного назначения машины и критическая оценка его формулировки.

Разработав конструкцию и сделав необходимые расчеты, конструктор (разработчик) в описании конструкции дает формулировку служебного назначения машины и ее сборочных единиц, обоснованно назначает технические требования и нормы точности, вытекающие из служебного назначения, указывает методы достижения требуемой точности (в соответствии с данными по количественному выпуску машины), обеспечивающие более экономичное ее изготовление.

13.2. Технологичность сборочных единиц

Любую машину можно разделить на основные части (агрегаты, см. [гл. 1](#)), которые, в свою очередь, состоят из сборочных единиц. На [рис. 13.1](#) изображены детали, входящие в сборочную единицу «масляный насос автомобильного двигателя». Каждая деталь имеет свой номер, который указывают в Перечне деталей сборочных единиц автомобильного двигателя ([табл. 13.1](#)).

Каждая из сборочных единиц должна быть технологичной, для того чтобы обеспечить минимальные трудовые и материальные затраты на ее изготовление и сборку.

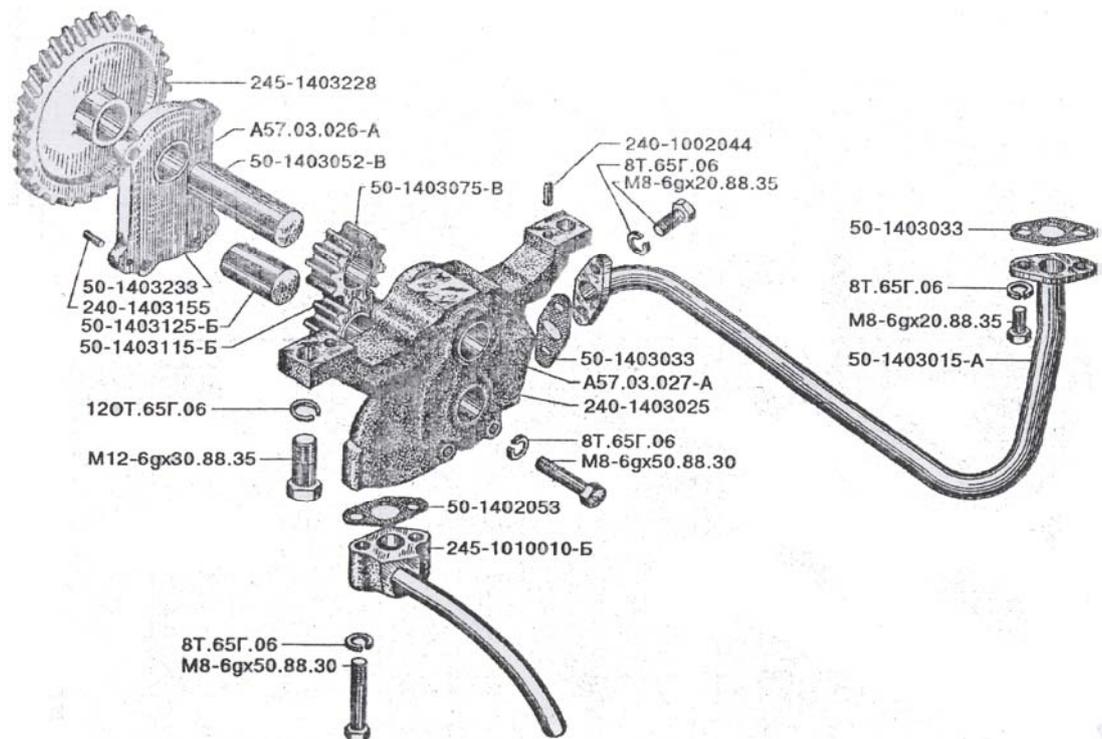


Рис. 13.1. Сборочная единица «масляный насос»

Таблица 13.1

Детали сборочной единицы «масляный насос»

Номер детали	Кол-во	Наименование
240-1002044	2	Штифт
245-1010010-Б	1	Маслоприемник
50-1402053	1	Прокладка
245-1403010	1	Насос масляный
50-1403015-А	1	Патрубок
240-1403020	1	Корпус
240-1403025	1	Корпус
50-1403033	2	Прокладка
50-1403052-В	1	Валик
50-1403075-В	1	Шестерня
50-1403115-Б	1	Шестерня
50-1403125-Б	1	Палец
240-1403150	1	Крышка
240-1403155	1	Крышка
245-1403228	1	Шестерня
50-1403233	2	Штифт
А57.03.026-А	1	Втулка
А57.03.027-А	1	Втулка
М8-6gx20.88.35	4	Болт
М8-6gx50.88.35	6	Болт
М12- 6gx30.88.35	2	Болт
8Т.65Г.06	10	Шайба
120Т.65Г.06	2	Шайба

Эффективность выполнения сборочных процессов, качество изделий и их себестоимость во многом зависят от их конструкции. Одно из основных требований к процессу сборки – изделие должно состоять из отдельных сборочных единиц, каждая из которых должна содержать как можно меньшее число деталей. Их сокращение достигается путем увеличения функциональности деталей. Это уменьшает объем сборочных операций, а иногда и полностью исключает необходимость в их выполнении. Например, винт с буртом выполняет функции винта и шайбы (рис. 13.2, а). При его изготовлении из капрона обеспечивается также уплотнение соединения. Выполнение на торце бурта зубьев (рис. 13.2, б) или отгибание края бурта (рис. 13.2, в) уменьшает возможность самоотвинчивания. Изготовление винта с заходной частью, обеспечивающей сверление и нарезание резьбы (рис. 13.2,

2) в сопряженной детали, облегчает процесс механизации и автоматизации соединения и закрепления деталей.

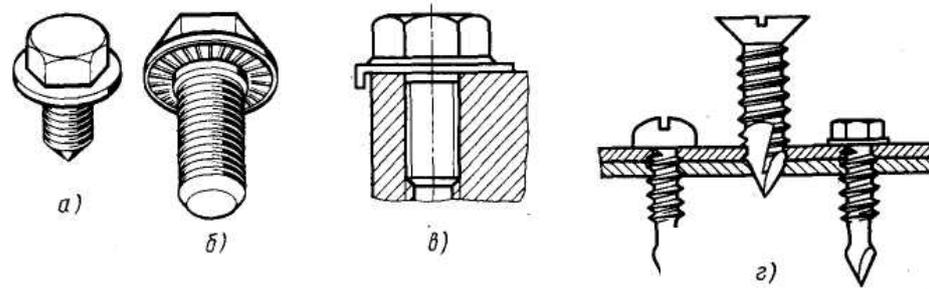


Рис. 13.2. Технологические конструкции деталей многофункционального назначения

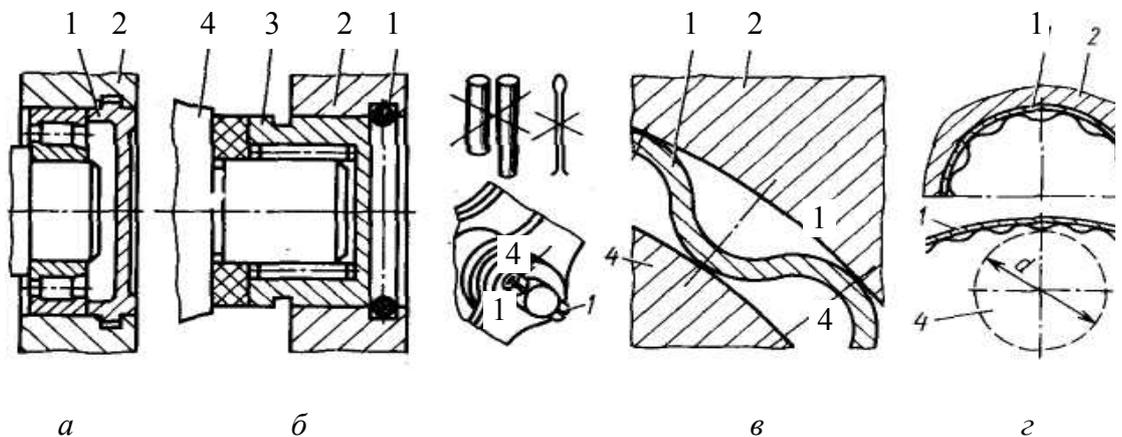


Рис. 13.3. Технологичные соединения изделий с использованием упругих деталей

Сокращение числа деталей и сборочных операций при изготовлении приспособлений и многих других изделий машиностроения может быть достигнуто посредством укладки соединяемых деталей в форму и последующей их заливкой эпоксидной смолой или легкоплавким сплавом, образующим при охлаждении корпусную деталь.

Штамповкой также возможно обеспечить образование базовой детали сложной формы одновременно с соединением ряда деталей в сборочную единицу. Вальцевание позволяет образовывать неразъемные соединения.

Другой эффективный путь сокращения числа деталей, особенно крепежных (винтов, штифтов и шпонок), и, следовательно, уменьшения трудоемкости изготовления изделий – применение упругих крышек, втулок, упорных колец и пальцев, которые к тому же устанавливать проще. Перед сборкой размеры таких деталей увеличиваются за счет растяжения или уменьшаются путем сжатия для увеличения зазора в процессе сборки соединения.

Обычную прижимную крышку крепят к корпусу винтами. Для ее установки необходимо сверлить отверстия и нарезать резьбу под винты в корпусе, обрабатывать его торцовую поверхность под крышку, а затем завинчивать и затягивать винты. В измененной технологичной конструкции (рис. 13.3, а) для сборки достаточно установить только упругую крышку 1. При этом значительно сокращаются затраты времени на изготовление деталей и сборку изделий, а отсутствие отверстий в корпусе 2 под винты позволяет уменьшить толщину его стенок. Все перечисленное выше обеспечивает экономию материальных средств и материалов.

Изменение конструкции карданного вала 4 (рис. 13.3, б) комбайна, в котором подшипник 3 в осевом направлении крепят с помощью упорного кольца 1 вместо крышки с прокладками, винтами и контрящими шайбами, позволило сократить число крепежных и других деталей. Такой же эффект достигается при замене этих деталей упругими пальцами 1 и втулками (рис. 13.3, в). При использовании упругих пальцев и втулок отверстия в сопряженных деталях могут быть выполнены пониженной точности (после обычного сверления). Гофрированные кольца из пружинной стали также имеют большую упругость (рис. 13.3, г). Упругое сжатие рифлений и определенная форма кольца обеспечивают необходимую силу для закрепления детали в сборочной единице. Изготавливают рифления прокаткой. Для регулирования направления сжатия и обеспечения заданной жесткости кольца 1 снабжены по краям цилиндрическими кольцевыми участками. Кольца 1 применяют для валов 4 и шестерен 2 при передаче значительных крутящих моментов вместо шлицевых и шпоночных соединений, а также для установки в отверстия под подшипники корпусных деталей из легких сплавов. Точность цилиндрических посадочных поверхностей сопряженных деталей обычно 7-го качества.

Гофрированные кольца компенсируют тепловые деформации деталей, возникающие в процессе работы изделия, гасят вибрации и тем самым увеличивают срок службы изделия.

Упругие детали одновременно обеспечивают соединение и закрепление деталей разборных изделий. Для неразборных соединений целесообразно применять штифты с прорезями (рис. 13.4). Такие штифты вводятся в отверстия деталей со значительными зазорами, а в завершающий период сборочного процесса деформируются, создавая необходимый натяг в соединении. Использование переходных посадок в изделиях при автоматической сборке невозможно из-за заклинивания деталей при их установке.

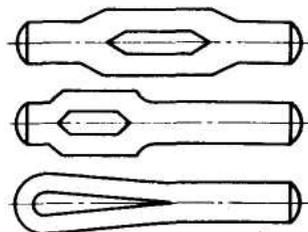


Рис. 13.4. Деформируемые штифты

Деталь наибольших габаритных размеров должна по возможности быть базовой и выполнять функции сборочного приспособления. Базовая деталь не должна деформироваться под действием рабочих нагрузок, ее положение должно быть устойчивым и неизменным. Для этого нужно, чтобы деталь имела низко расположенный центр тяжести и явно выраженные базовые поверхности (плоские – для обеспечения создания установочной базы и цилиндрические – для образования направляющей и опорной баз или двойной направляющей базы). Желательно, чтобы при сборке изделия базовая деталь обеспечила установку присоединяемых деталей, сборочных единиц и выполнение всех других технологических переходов за одну установку. Присоединяемые детали должны свободно устанавливаться на базовую сверху простым прямолинейным движением рабочего инструмента, для чего в корпусной детали нужно предусмотреть достаточное пространство.

Всем деталям собираемых изделий необходимо придать конфигурацию, облегчающую их ориентацию, базирование, транспортирование и соединение. Для облегчения соединения деталей их сопрягаемые поверхности должны иметь возможно большие по размерам заходные фаски с малыми углами. Фаски нужно предусматривать на базовой детали, так как ее используют для установки многих деталей изделия. Не вызывает затруднений получение заходных фасок на деталях, изготавливаемых на металлорежущих станках, поэтому на таких деталях их необходимо предусматривать в первую очередь. Угол заходной фаски должен быть $10\text{--}15^\circ$, если вал устанавливают в металлическую деталь, и около 8° , если его запрессовывают в деталь из пластмассы.

На подшипниках, тонкостенных втулках и кольцах или на сопрягаемых с ними цилиндрических поверхностях деталей желательно заходные фаски выполнять ступенчатыми (рис. 13.5, а): вначале с углом $30\text{--}45^\circ$ для облегчения установки детали в отверстие корпуса или посадки их на вал, а затем с углом $10\text{--}15^\circ$ для уменьшения силы запрессовки и деформаций кольца или втулки.

Сложность соединения резьбовых деталей связана с тем, что они по своим конструктивным параметрам и прочностным свойствам не могут быть завинчены из-за завальцовки захода резьбы у некоторых из них. Особенно часто это происходит при завинчивании гаек и коротких винтов. Количество брака можно снизить, если торцы винтов 1 выполнять в виде полусферы (рис. 13.5, б), а в сопряженных деталях предусмотреть заходные фаски 2. При этом осевая нагрузка в процессе сборки будет распределяться равномерно по вершинам резьбы в отверстии сопряженной детали и вероятность смятия захода витка резьбы уменьшится. Затраты времени на сборку снижаются в среднем на 30 %, производительность повышается на 40–50 %.

При установке пружин, а также соединении деталей с резьбовыми и цилиндрическими поверхностями сопряжения производительность можно повысить, если предусмотреть на валу направляющие конические или цилиндрические цапфы 3 и выточки 4 в корпусе (рис. 13.5, б), которые дают

возможность при сборке базировать устанавливаемую деталь непосредственно по базовой детали и тем самым исключить влияние точностных параметров технологической оснастки автоматической сборочной машины на процесс соединения деталей.

Для облегчения соединения, отверстия под крепежные детали в базовой детали должны размещаться равномерно, и точность их положения необходимо регламентировать. Количество типов посадочных и сопрягаемых поверхностей, а также применяемых видов соединений деталей должно быть минимальным.

Для сборки неудобны шпоночные и шлицевые соединения. Их целесообразно заменить на цилиндрические или конические соединения деталей с гарантированным натягом. При соединении деталей по коническим посадочным поверхностям в первоначальный момент их сопрягают со значительным зазором, который облегчает процесс сборки, а по мере их перемещения зазор выбирается и создается необходимый натяг. Вследствие этого при замене одного вида соединения деталей на другой функциональное назначение изделия не изменяется (обеспечивается передача требуемого крутящего момента). Если замена конструктивной формы посадочной ступени невозможна, то по контуру шпоночного паза втулки должны быть предусмотрены заходные фаски достаточно большой ширины (1,5–2 мм), а на шпонке – скругления на торцах (рис. 13.5, з). Заходные фаски облегчают процесс соединения деталей и сокращают затраты на его выполнение, так как сборка оказывается возможной даже при разности относительного углового положения деталей в несколько градусов.

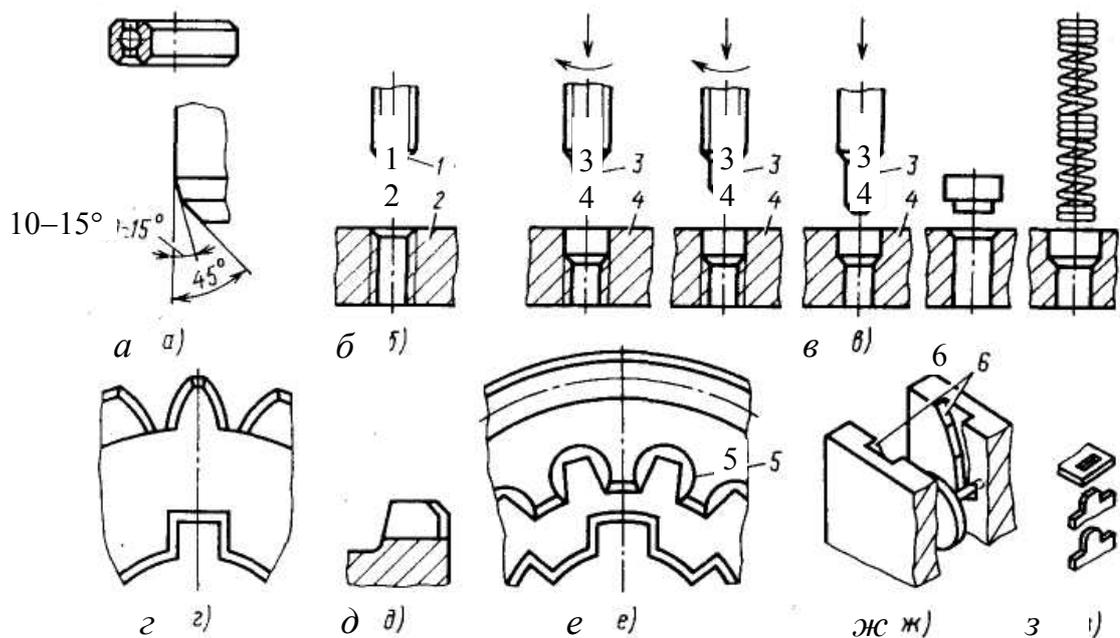


Рис. 13.5. Технологичные конструкции заходных поверхностей соединяемых деталей

Аналогичное явление наблюдается при сборке шлицевых соединений. При отсутствии фасок по периметру шлицев или закруглений на торцах шлицевого вала разность относительного углового положения соединяемых деталей не должна быть больше нескольких минут. Обеспечить такую точность трудно, а иногда невозможно. С подобными трудностями встречаются и при сборке зубчатых передач. Для облегчения сборки зубчатых передач с аксиального направления нужно предусматривать скругления на торцах зубьев колеса (рис. 13.5, *д*, *е*). Выбирают колеса с меньшим числом зубьев, так как меньшими будут затраты на скругление зубьев. В ряде случаев колеса имеют скругления на торцах зубьев для облегчения их сцепления при работе машины. Аналогичные функции они будут выполнять при сборке. Такой же результат может быть достигнут, если использовать ранее полученные при зенкерованиях углубления δ на колесах перед прошивкой зубьев.

Для установки присоединяемых деталей удобны разъемные корпусные и другие базовые детали, отверстия и пазы *б* (рис. 13.5, *ж*) которых имеют большую ширину в первоначальный период сборки соединения и требуемую по служебному назначению изделия в конечном положении. Аналогичный эффект достигается при снятии фасок и скруглениях на соединяемых деталях (рис. 13.5, *з*). Для удобства монтажа всех деталей корпусная деталь должна иметь технологические базы, обеспечивающие высокую точность ее установки (базирования и закрепления).

13.3. Разработка последовательности сборки

Для обеспечения получения качественных изделий нужно выявить возможные варианты последовательности их сборки, при которых гарантируется получение объектов с требуемыми свойствами. Для установления последовательности сборки изделий необходимо уточнить их служебное назначение, проанализировать технические требования и выбрать методы достижения точности замыкающих звеньев, соответствующих условиям объекта производства.

Желательная последовательность установки деталей в изделие заложена конструктором, но при сборке в большинстве случаев она полностью не выдерживается из-за конструктивного выполнения соединяемых деталей (соотношения их размеров). На последовательность выполнения сборочного процесса значительное влияние также оказывают выбранные методы достижения точности замыкающих звеньев, размерных цепей изделия. Если качество изделия обеспечивается методами полной или групповой взаимозаменяемости, то последовательность сборки может быть любой (в соответствии с расположением деталей на валах или других базовых деталях).

При применении методов неполной взаимозаменяемости, пригонки и регулировки определяющим фактором при выборе варианта последовательности установки деталей в изделия служит минимальный объем разборочно-сборочных, пригоночных и регулировочных работ. Если в процессе

сборки применяют метод пригонки в малозвенных (с тремя-четырьмя звеньями) размерных цепях, то пригонку деталей нужно выполнять до того, как будут установлены подшипники, манжеты и другие детали собираемого изделия, с тем чтобы исключить попадание стружки на них. При использовании методов пригонки и регулировки с применением специальных подвижных и неподвижных компенсаторов для достижения точности замыкающих звеньев изделий вначале необходимо установить все детали, входящие в эти размерные цепи, а потом компенсатор, который, если это нужно, фиксируют крепежными элементами, а иногда и крышками.

Для изделий высокой точности, сборка которых должна осуществляться по методам неполной взаимозаменяемости, пригонки деталей или регулировки с изменением их положения, сборку следует начинать с установки деталей той размерной цепи, с помощью которой решается наиболее ответственная задача. Такой задачей обычно является обеспечение относительных поворотов исполнительных поверхностей деталей изделия. Далее, независимо от назначения изделия, сборку надо вести с установки тех сборочных единиц и деталей, относительные повороты поверхностей и размеры которых являются общими звеньями, принадлежащими наибольшему числу размерных цепей. Для двухступенчатых редукторов это средний (промежуточный) вал, воспринимающий и передающий крутящий момент наибольшему числу других валов редуктора. Затем следует переходить к установке тех сборочных единиц и деталей, относительные повороты поверхностей и размеры которых являются общими звеньями, принадлежащими постепенно уменьшающемуся числу размерных цепей. Заканчивается сборка изделия обычно установкой крышек, маслоуказателей, затяжкой винтов крепления и ввинчиванием сливных пробок.

При применении ЭВМ для определения последовательности установки деталей в изделия нужно осуществить оптимальную последовательность кодирования деталей. Кодирование целесообразно начинать с вала I , на котором размещено наибольшее число J деталей и сборочных единиц собираемого изделия, а затем переходить к кодированию других валов ($I + 1$) с установленными на них деталями в той последовательности, в которой передается движение.

Последовательность кодирования деталей и сборочных единиц на базовой детали (валу) нужно выполнять начиная от посадочной ступени большего диаметра в радиальном направлении от меньшего размера к большему, а далее последовательно в осевом направлении от одной ступени к другой справа налево и слева направо от указанной выше ступени. При кодировании необходимо указать лишь деталь или сборочную единицу, так как в памяти ЭВМ хранятся данные о характере соединения, посадочных и габаритных размерах деталей. Всем деталям одного комплекта, включая базовый вал, присваивается номер, первая цифра которого соответствует номеру вала, вторая – порядковому номеру присоединяемой детали в соответствии с ее положением относительно базового торца вала (ступени большего диаметра). Валу всегда присваивается первый из очередных номеров.

Имея исходные данные (чертежи общего вида изделия и рабочие чертежи деталей, технические требования на их изготовление), зная программу выпуска изделий в год, описывают (кодируют) сборочные единицы и рассчитывают количество узлов по программе выпуска. Полученный в результате этой работы итоговый документ вводится в вычислительную машину. Таким образом, в памяти ЭВМ будут храниться данные о всех деталях и их положениях в собираемом объекте, что дает возможность определить автоматизированным путем последовательность сборки изделия.

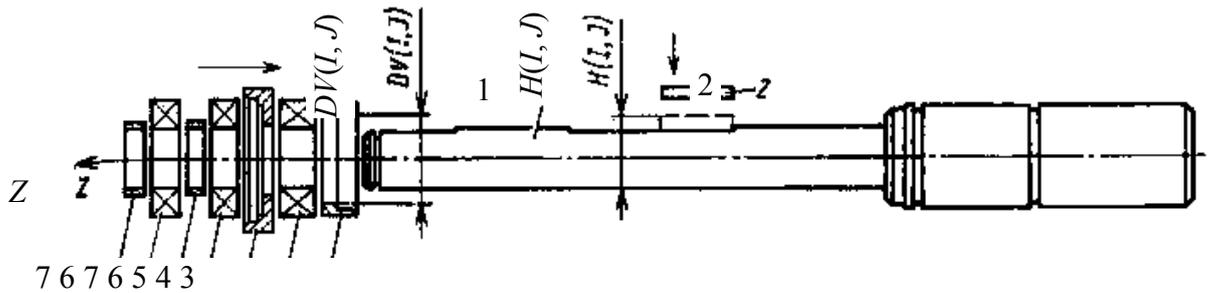


Рис. 13.6. Схема установки присоединяемых деталей:
 1 – базовая деталь-вал; 2 – первая присоединяемая деталь-шпонка;
 3–7 – последующие присоединяемые детали

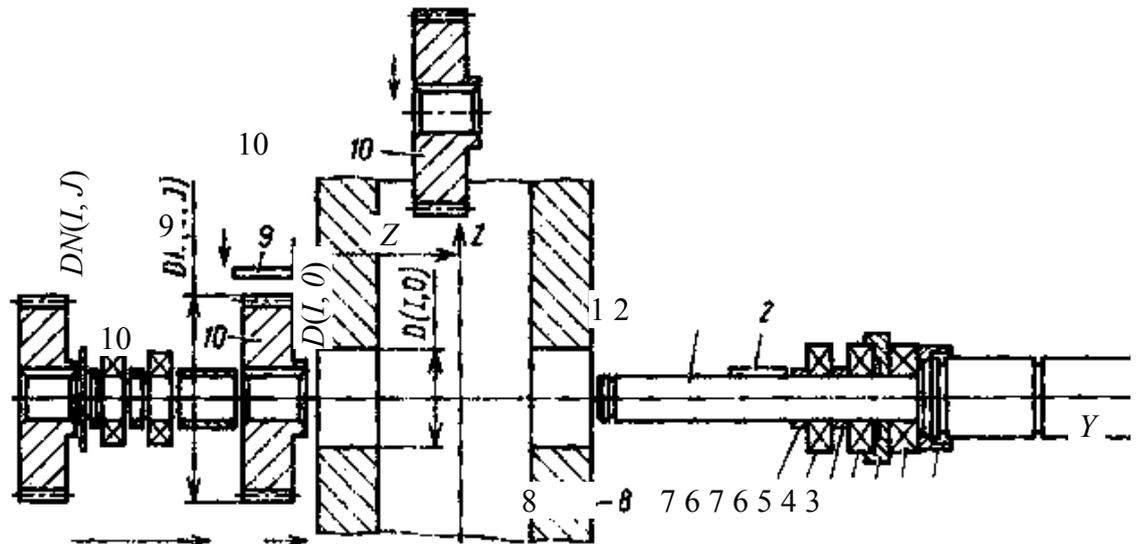


Рис. 13.7. Определение направления, с которого возможна установка детали:
 1 – базовая деталь; 2 – 1-я шпонка; 3–7 – последующие присоединяемые детали;
 8 – корпус; 9 – 2-я шпонка; 10 – шестерня

Кратко алгоритм сборки узла может быть представлен следующим образом:

1. Устанавливается первая базовая деталь изделия – вал 1, $J = 1$.
2. Берется первая присоединяемая деталь и затем все последующие $J = J + 1$.

3. Выполняется проверка: не является ли присоединяемая деталь шпонкой?

Если данная деталь – шпонка ($SH = 1$), то ее необходимо пригнать до размеров паза вала, а затем запрессовать в него (рис. 13.6).

Такая последовательность обеспечивает удобство выполнения работ и исключает возможность попадания стружки в подшипники и на другие детали собираемого изделия. Поэтому пригоночные работы такого вида целесообразно выполнять в первую очередь.

4. Берется вторая присоединяемая деталь, а затем все последующие детали $J = 2$.

5. Проверяется возможность установки второй присоединяемой детали при запрессованной шпонке $H(I, J) < DV(I, J)$, где $H(I, J)$ – диаметр посадочной поверхности вала вместе со шпонкой; $DV(I, J)$ – диаметр отверстия устанавливаемой детали.

6. Если диаметр посадочной поверхности вала со шпонкой больше, шпонка удаляется.

7. Берется следующая деталь $J = J + 1$. При этом вал с ранее установленными деталями следует считать комплексной деталью сложной конфигурации (рис. 13.6). Соответственно перерассчитываются размеры (диаметр и длина ступеней) данной детали.

Аналогично поступают и при установке всех последующих деталей.

8. Только после монтажа деталей на вал (если это возможно исходя из их конструктивных размеров и размеров корпуса) нужно вновь запрессовать шпонку 2 (рис. 13.6). В разъемный корпус редуктора детали можно устанавливать вдоль оси (с осевого направления) либо в разъем (с радиального направления). Целесообразна сборка с радиального направления, поскольку можно заранее установить все детали на вал. После этого устанавливают собранный комплект в корпус. При сборке с аксиального направления часто этого сделать не удастся, так как габаритные размеры $DV(I, J)$ устанавливаемых на вал деталей 10 (рис. 13.7) могут превышать диаметральные размеры $D(I, J)$ отверстий под подшипники в корпусе 8. Детали 10, если требуется, пригоняют по валу 1 к шпонке 2, которую затем удаляют, заводят в корпус 8 через окна и устанавливают на посадочную ступень вала. Детали 3–7, габаритные размеры которых меньше диаметра $D(I, 0)$ отверстия в корпусе 8, целесообразно устанавливать на вал 1 заранее до общей сборки изделия. Остальные детали следует монтировать на вал 1 после его установки в корпус 8.

9. Берется вторая присоединяемая деталь $3J = 2$.

10. Проверяется возможность установки деталей через окно 8.

11. Определяется возможность установки детали с аксиального направления в отверстие корпуса 8 под подшипники 6: $D(I, J) < D(I, 0)$, где $DN(I, J)$ – наружный диаметр устанавливаемой детали и т. д.

13.4. Автоматизированное проектирование технологии сборочно-монтажных работ

Разработка новых изделий во всех областях техники в современных условиях невозможна без перехода на новые информационные технологии, базирующиеся на концепции CALS – ИПИИ-технологии (ИПИИ – информационная поддержка жизненного цикла изделия). Базовыми компонентами для создания интегрированных систем на основе концепции ИПИИ-технологий являются системы конструирования (CAD), технологической подготовки производства (CAM), инженерного анализа (CAE), управления проектными данными (PDM), управления предприятием (ERP). Опыт внедрения интегрированных систем в промышленную эксплуатацию показывает, что работы по настройке базовых компонентов и разработка информационного обеспечения являются сложными и трудоемкими, а затраты на их реализацию могут значительно превосходить стоимость программного обеспечения.

Применение информационных технологий на различных этапах проектирования жизненного цикла изделия неравномерно. Наибольшие успехи достигнуты на предприятиях авиационной промышленности и особенно в решении вопросов геометрического моделирования, проведения комплекса проектно-конструкторских расчетов, разработки интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) и электронных макетов изделия с использованием CAD-систем. Однако в области технологической подготовки производства отставание остается значительным. В настоящее время хорошо освоены и внедрены в промышленную практику САМ-системы, автоматизирующие подготовку управляющих программ для механической обработки деталей изделия и технологической оснастки на оборудовании с ЧПУ. Системы, автоматизирующие процессы технологического проектирования по другим видам работ, используются значительно реже. Большинство из них носит локальный характер и не соответствует требованиям ИПИИ-технологий прежде всего по интеграционным возможностям. Отсутствие на российских предприятиях комплекса прикладных систем технологического проектирования не позволяет решать задачи подготовки производства в соответствии с концепцией ИПИИ-технологий, поскольку не обеспечивается выполнение двух ключевых требований: полноты электронного определения изделия и непрерывности информационной поддержки. Отсутствие электронной технологической документации блокирует возможность реализации сквозных процессов проектирования – производства и не обеспечивает необходимой оперативной и достоверной информацией производственные подразделения, значительно снижая эффективность функционирования ERP-систем.

Зарубежные и отечественные маркетинговые исследования прогнозировали данную ситуацию, что позволило принять решение о разработке комплекса прикладных систем технологического проектирования по различным видам производств, в котором ключевая роль отводится системе автоматизи-

рованного проектирования технологических процессов сборочно-монтажных работ: сборка значительно влияет на другие виды производств, поставляющих комплектующие, средства технологического оснащения, а также на организацию всего производственного процесса изделия.

Цикловые графики сборки являются организационным стержнем, на который замыкаются графики работ по другим видам производств. Поэтому была поставлена задача создания системы, позволяющей не только формировать в электронном виде технологическую документацию сборочного производства, но и организовывать в соответствии с концепцией CALS интеллектуальную информационную поддержку технологического проектирования, работу с «большими сборками», интеграцию с информационными системами предприятия.

Анализ программных продуктов, появившихся на российском рынке за последние два года, показывает, что поставщики импортных CAD/CAM-систем не предлагают конечного программного продукта, адаптированного к эксплуатации на российских промышленных предприятиях. Кроме того, предлагаемый ими инструментарий для формирования технологических приложений по сборке является дорогостоящим.

Ряд базовых решений обеспечивается созданием комплекса автоматизированных систем технологического проектирования и методик проектирования с учетом развития информационных систем, для перехода авиационной промышленности на цифровое электронное макетирование и бесплазовую подготовку производства в системе технологического моделирования процессов. Бесплазовый метод проектирования – это метод автоматизированного построения контура деталей (с помощью компьютера) в трехмерном виде (плазовый метод дает двухмерное изображение).

Такая информационная поддержка технологического проектирования осуществляется на всех этапах реализации проекта (от эскизов до технологического сопровождения на этапах производства и эксплуатации) благодаря тому, что в системе реализованы механизмы многоуровневого моделирования технологических процессов, позволяющие реализовать вариантное проектирование технологии сборки на всех уровнях, в том числе выбор принципиальных конструктивно-технологических решений укрупненных и рабочих технологических процессов.

13.5. Технологическая подготовка производства серийных изделий

Задачей технологической подготовки производства (ТПП) серийных изделий является обеспечение технологической готовности производства к изготовлению указанных изделий, а также изделий, ранее освоенных другими изготовителями или изготавливаемых по технической документации иностранных фирм.

Организатором и ответственным исполнителем ТПП серийных изделий является их изготовитель, соисполнителями, при научно-технической или экономической целесообразности, – специализированные технологические организации.

Для проведения ТПП серийных изделий разработчик передает изготовителю:

- комплект рабочей конструкторской документации на изделие;
- документацию, содержащую определяющие технологические и организационные решения по производству изделия, отработанную при изготовлении и испытаниях опытных образцов;

- опытные образцы, прошедшие приемочные испытания. При необходимости, с целью сокращения сроков ТПП, разработчик (изготовитель опытных образцов) на договорной основе передает изготовителю серийных изделий:

- документацию на однотипные технологические процессы;
- конструкторскую документацию на однотипные средства технологического оснащения, отработанную по результатам изготовления и испытаний опытных образцов;

- управляющие программы для однотипного оборудования;
- средства технологического оснащения, пригодные для использования;

- ведомости применения материалов и комплектующих изделий;
- расчет трудоемкости изготовления опытных образцов;
- перечень квалификации исполнителей и др.

Изготовитель совместно с соисполнителями разрабатывает план (график) ТПП серийных изделий в виде самостоятельного документа или в составе плана (графика) постановки изделия на производство. При этом учитывают:

- сроки освоения серийного производства изделия;
- планируемые объемы выпуска изделий по годам освоения;
- прогноз устойчивости сбыта в течение нескольких лет;
- трудоемкость ТПП;

- состояние организационно-технического уровня производства и возможность его повышения с целью обеспечения коммерческой стратегии изготовителя на рынке;

- возможность кооперации и специализации производства для ритмичного обеспечения изготовления изделий качественными материалами, деталями, сборочными единицами, комплектующими изделиями, средствами технологического оснащения.

ТПП серийных изделий предусматривает выполнение следующих основных работ:

- проработку рабочей конструкторской документации на серийное изделие с учетом технологичности заложенных в нее решений;
- разработку или уточнение (корректировку) с использованием инфор-

мационных массивов описаний конструкторско-технологических решений: технологических процессов изготовления серийного изделия в соответствии с государственными стандартами ЕСТД; специальных средств технологического оснащения; управляющих программ для автоматизированного технологического оборудования.

В задачи ТПП входит:

- приобретение (изготовление) специальных средств технологического оснащения для производства серийных изделий;
- обеспечение необходимой технологической информацией реконструкции или нового строительства производственной и испытательной баз;
- уточнение технологической документации по результатам изготовления и квалификационных испытаний установочной серии (первой промышленной партии);
- обеспечение требований ресурсосбережения, экологии и охраны труда при изготовлении и испытаниях серийных изделий.

Изготовитель серийных изделий по требованию заказчика или согласованию с разработчиком в целях сокращения сроков постановки изделий на производство выполняет наиболее сложные и трудоемкие работы ТПП одновременно с изготовлением и испытаниями опытных образцов.

Критерий завершенности ТПП серийных изделий – фактическое выполнение работ, предусмотренных планом, подтвержденное оценкой технологической готовности производства к изготовлению серийных изделий в соответствии с критерием завершенности ТПП опытных образцов и единичных изделий.

Таким образом, система разработки и постановки продукции на производство (СРПП) является установленной государственными стандартами системой организации и управления процессом технологической подготовки производства.

Основное назначение СРПП заключается в установлении системы организации и управления процессом технологической подготовки производства, обеспечивающей:

- единый для всех предприятий и организаций системный подход к выбору и применению методов и средств технологической подготовки производства, соответствующих достижениям науки, техники и производства;
- освоение производства и выпуска изделий высшей категории качества в минимальные сроки, при минимальных трудовых и материальных затратах на ТПП на всех стадиях создания изделий, включая опытные образцы (партии), а также изделия единичного производства;
- организацию производства высокой степени точности, допускающую возможность непрерывного его совершенствования и быструю переналадку на выпуск новых изделий;
- рациональную организацию механизированного и автоматизированного выполнения комплекса инженерно-механических и управленческих работ;

- взаимосвязи ТПП и управления его с другими системами и подсистемами управления;
- решение задач, группируемых по следующим основным функциям:
 - обеспечение технологичности конструкции изделия;
 - разработка технологических процессов;
 - проектирование и изготовление средств технологического оснащения;
 - организация и управление процессом ТПП.

Рационально построенный технологический процесс должен совмещать выполнение технических, экономических и организационных задач, решаемых в данных производственных условиях, т. е. обеспечить выполнение всех требований к качеству изделия, предусмотренных конструкторской документацией, при наименьших затратах труда в количестве и сроки, установленные календарным планированием.

ГЛАВА 14. ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

14.1. Проблемы машиностроительного производства и методы их решения

К проблемам отечественного машиностроительного производства сегодня можно отнести отсутствие или недостаточно широкое использование новых организационно-управленческих и информационных технологий, а также длительное внедрение ресурсосберегающих, наукоемких и высоких технологий. Следствием вышеперечисленных проблем является низкая конкурентоспособность продукции.

Для решения названных проблем создаются методики расчета и проектирования технологических процессов литья, обработки давлением, сборки на основе информационных технологий, а также новые формы организации предприятий по типу виртуальных.

В качестве примера повышения эффективности машиностроительных производств рассмотрим применение автоматизированного проектирования при серийном производстве крупногабаритных тонкостенных *отливок из легкого сплава*. К технологическому процессу в этом случае дополнительно предъявляют требования по производительности, стабильности размерных параметров, поэтому рационально использовать литье в кокиль. При этом более жестко формулируются ограничения по расходу металла на отливку, актуальные для дорогостоящих сплавов, в частности магниевых, для которых так же строго регламентирована величина используемого возврата. В результате увеличиваются сроки технологической подготовки производства, зачастую связанные с существенной доработкой дорогостоящей литейной оснастки.

Для рассматриваемых отливок очевидна актуальность решения задач проектирования технологического процесса литья на этапе конструирования оснастки, а не ее доводка по результатам апробации. К таким задачам в первую очередь следует отнести расчеты:

- параметров литниковой системы;
- температуры и времени заливки расплава в форму;
- распределения температуры расплава, заполнившего рабочую полость формы;
- затвердевания стенок отливки по ее высоте;
- дистанции действия прибылей по высоте отливки;
- размеров минимально необходимого технологического напуска по

высоте отливки;

- требуемого времени затвердевания приливов (бобышек) отливки и параметров холодильников внутреннего песчаного стержня.

Разработаны методики решения приведенных задач, и в частности, адаптированные применительно к корпусным отливкам из магниевых сплавов кольцевой формы (диаметром до 800 мм) с тонкими стенками (10–15 мм). Эти отливки вертикально расположены в кокиле (высотой до 1200 мм) с песчаным стержнем внутри. Полость отливки представляет собой сложное сочетание ребер жесткости, бобышек и полок различной толщины.

Для расчетов последовательности затвердевания и питания протяженной, вертикально расположенной стенки отливки необходимо знать распределение исходной температуры расплава, заполнившего рабочую полость формы при заданной температуре заливки расплава в стояки литниковой системы.

Результаты анализа последовательности затвердевания стенки отливки служат основой для расчета технологического напуска, обеспечивающего ее питание. При этом используют критерий непрерывности фильтрационного питания.

Расчет последовательности затвердевания отливки выполняется на основе аналитического решения задачи в теории затвердевания. Отличие заключается в определении теплообмена в комбинированной форме в виде суммы коэффициентов аккумуляции теплоты кокиля и песчаного стержня. При этом для кокиля рассчитывают эффективный коэффициент аккумуляции теплоты путем замены кокиля эквивалентной в тепловом отношении полуограниченной формой и использования математической модели его температурного поля.

Одним из важных параметров проточно-поперечного заполнения формы расплавом при литье с вертикально-щелевой литниковой системой является максимально возможная длина поперечного растекания расплава в рабочей полости формы.

Питание приливов на внутренней поверхности корпусной отливки обеспечивается в том случае, если время затвердевания прилива меньше времени затвердевания стенки отливки на уровне расположения прилива. Наиболее эффективным средством воздействия на время затвердевания прилива в песчаном стержне является металлический холодильник, установленный на поверхности прилива. Максимально возможное использование холодильника зависит от критерия его охлаждения, определяющего влияние отвода теплоты от холодильника в песчаную форму на его температуру.

Предложенные методики расчетов составили основу пакета прикладных программ проектирования технологического процесса литья корпусов из легких сплавов ([рис. 14.1](#)). Автоматизированное проектирование расширяет возможности и повышает надежность решения производственных задач.

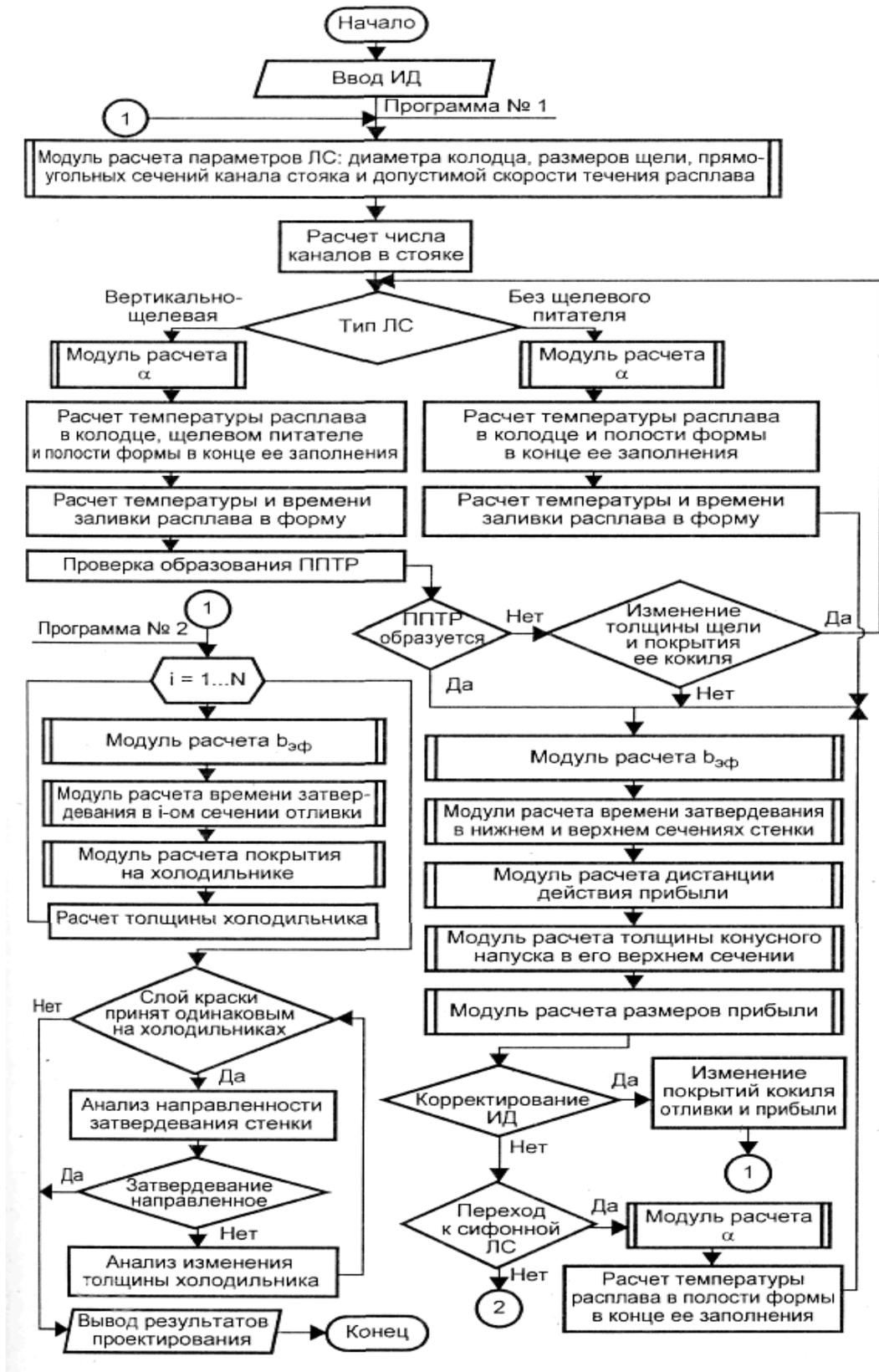


Рис. 14.1. Блок-схема пакета прикладных программ проектирования технологических процессов литья в кокиль с песчаным стержнем, крупногабаритных корпусов типа цилиндрической оболочки из легких сплавов: ЛС – литниковая система; ИД – исходные данные; ППТР – проточно-поперечное течение расплава

Практика применения CAE-систем при разработке технологических процессов обработки металлов давлением. Публикации, посвященные CALS-технологиям, применяемым на конструкторско-технологической стадии подготовки производства, главным образом затрагивают проблемы, связанные с работой CAD-систем, меньшее внимание уделяется САМ- и PDM-системам. Однако наименьшее число публикаций приходится на долю программных продуктов, используемых для математического моделирования проектируемых изделий и процессов, т. е. CAE-систем, что говорит о недостаточно широком применении этого класса продуктов. Это объясняется рядом причин: высокой стоимостью подобных систем, нехваткой подготовленных специалистов, наличием альтернативных способов расчета, базирующихся на классических безмашинных методах анализа. Следует заметить, что стоимость рабочего места, оснащенного «тяжелой» САД-системой, соизмерима со стоимостью подобного рабочего места с САЕ-системой. Однако внедрение САД-систем идет на производстве значительно более высокими темпами, особенно на предприятиях, экспортирующих свою продукцию за рубеж, так как информационная поддержка изделия подразумевает прежде всего его конструкторское сопровождение. Следует также учитывать, что информация о технологической подготовке может содержать производственные секреты, поэтому остается внутри предприятия. Похожая ситуация и с результатами математического моделирования, представляющими собой основу для ноу-хау, в связи с чем на западных предприятиях конкуренция заставляет производителей активно применять САЕ-системы. На отечественном рынке, сориентированном, к сожалению, в сторону сырьевых отраслей, должная конкуренция, за исключением современных высокотехнологических производств, пока отсутствует, что тормозит широкое внедрение САЕ-технологий.

Работа современных САЕ-систем базируется, как правило, на методе конечных элементов (МКЭ), который относится к группе проекционно-сеточных методов. В его основе лежит замена искомой непрерывной функции ее дискретной моделью. Для этого исследуемую область разбивают на множество подобластей – конечных элементов, представляющих собой фигуры в виде плоских либо объемных многоугольников с узловыми точками в их вершинах, а для комплекс-элементов – дополнительными узлами на сторонах многоугольников. В рамках каждого конечного элемента искомая функция аппроксимируется полиномом, который в узловых точках приобретает определенные значения. Эта замена на уровне конечных элементов представляет собой первый этап моделирования – локальную аппроксимацию, которая позволяет легко задавать и контролировать граничные и начальные условия решения задачи. Для рассмотрения зоны деформации как единого целого переходят ко второму этапу – глобальной аппроксимации. Объединение конечных элементов в единую модель осуществляется путем уравнивания значений полиномов соседних элементов в каждой их совместной узловой точке. Искомые значения функции определяют различными методами. В итоге математическая модель заменяется системой алгебраических уравнений.

Значительным преимуществом МКЭ является возможность моделирования деформационных нестационарных процессов. Для этого на базе разработанной модели получают ряд последовательных решений с определенным шагом по времени. Причем решение, найденное на предыдущем шаге, применяют как предварительное (опорное) для последующего шага.

Особым классом задач являются задачи обработки металлов давлением (ОМД), в которых требуется учитывать нелинейный характер взаимосвязи между напряжениями и деформациями в пластической области, что в существенной мере усложняет решение по сравнению с другими областями механики. Поэтому в качестве неизвестных функций при построении математических моделей деформационных процессов рассматривают скорости перемещения узловых точек либо скорости деформации. Метод конечных элементов позволяет с большой точностью исследовать динамику и кинематику деформационных процессов в любой части исследуемой области с учетом реологических особенностей деформируемых материалов как гомогенного, так и гетерогенного строения. В отличие от аналитических методов, МКЭ дает возможность строить более совершенные математические модели, в том числе и объемные, основанные на значительно меньшем числе допущений и ограничений. Поэтому результаты исследований, полученные с его помощью, более объективны. Метод конечных элементов представляет собой весьма универсальный метод, имеющий простую физическую основу и математическую форму, которая реализуется с помощью гибкого алгоритма, хорошо приспособленного для решения на ЭВМ.

Появление нового поколения программных средств заставляет совершенно по-новому взглянуть на ситуацию, возникшую на стадии конструкторско-технологической подготовки производства. С одной стороны, инженеры-практики получили мощное средство для проектирования технологических процессов, дающее исчерпывающую информацию о динамике изменения напряженно-деформированного состояния при пластическом течении материала. С другой стороны, еще не накоплено достаточного опыта и навыков применения новых методов при проектировании технологических процессов и конструировании штамповой оснастки.

Современные САЕ-системы можно условно разделить на два класса. К первому классу относятся системы, ориентированные главным образом на конструкторов и разработчиков новых изделий. Их применяют для моделирования работы технических объектов при различных режимах эксплуатации. Это, как правило, универсальные продукты, позволяющие решать широкий круг прикладных задач, в том числе связанных с анализом технологических процессов. Универсальность подобных продуктов обеспечивается за счет предоставления пользователю больших возможностей на препроцессорной стадии моделирования, поэтому при построении математической модели могут быть учтены всевозможные особенности изучаемого объекта. Однако для получения адекватных результатов требуется высокая квалификация пользователя, который должен хорошо разбираться не только в сложном интерфейсе подобных систем (Ansys/LS DYNA, Nostran, Portran и

др.), но и в особенностях конечно-элементного анализа.

Вторую группу программных продуктов используют для исследования технологических процессов. CAE-системы этого класса, как правило, ориентированы на решение узкого круга задач и позволяют изучать конкретные виды технологических процессов. Хотя эксплуатация подобных систем максимально упрощена разработчиками, квалификация пользователей должна быть высокой.

Занимаясь математическим моделированием сложных многопараметрических процессов, к числу которых, безусловно, относятся процессы ОМД, нужно иметь в виду, что даже самые совершенные модели отличаются от реальных предметов или процессов. Получаемые результаты конечно-элементного анализа позволяют исследователю понять основные тенденции изучаемого процесса и получить по нему довольно точные количественные данные по распределению температурно-скоростных полей и компонентов тензоров напряжений и деформаций.

В настоящее время накоплен некоторый опыт применения программ математического моделирования для анализа пластического формоизменения гомогенных и гетерогенных материалов в процессах ОМД: решаются задачи исследования пластического течения металлов в процессах прокатки, прессования, волочения, гибки и объемной штамповки.

В связи с использованием математического моделирования в среде QForm разработан новый научно обоснованный технологический процесс получения изделий однопереходной горячей штамповкой. В ходе исследования моделировали течение металла в ручье штампа в зависимости от геометрических параметров заготовки и реализуемой схемы деформированного состояния. Результаты моделирования позволяют выбрать оптимальную схему штамповки, частично или полностью отказаться от дополнительных технологических припусков, что в конечном счете не только уменьшает расход металла и объем механической обработки, но и дополнительно повышает качество проработки металла штампованной поковки.

Сложность математического моделирования процесса прессования через язычковую матрицу заключается в особенностях течения металла при ее использовании. В этом случае в очаге деформации истекающий материал разделяется на два потока, огибает иглу матрицы, а затем сваривается под высоким давлением в рабочей зоне. Для задач математического моделирования процессов ОМД процесс сваривания не характерен, к тому же в программах моделирования деформируемый материал, как правило, задается сплошной неразрывной средой и эффект разделения материала и последующее его смыкание интерпретируют как появление зажима. Поэтому для данной задачи необходимо использовать те средства моделирования, где программно реализована возможность сваривания материала в очаге деформации. Расчет прессования через язычковую матрицу можно выполнить в программе DeForm.

Совершенно иным классом задач является моделирование процессов формоизменения гетерогенных материалов и получения изделий из волок-

нистых композиционных материалов (ВКМ) методами ОМД. Особенностью данных материалов является сочетание пластичной матричной составляющей и жесткого упрочняющего волокна. В этом случае целесообразно использовать универсальные конечно-элементные программы, например ANSYS-DYNA.

В настоящее время растет потребность в конструкционных силовых элементах большой прочности и малой массы. Для этих целей могут быть применены гнутые профили и оболочки из ВКМ системы Al–В. Получение данных изделий связано с проектированием многофакторного технологического процесса, основанного на критериальных подходах. Оценить вклад каждого из факторов (температура, деформация, время процесса и т. п.) можно, используя средства моделирования. В среде ANSYS-DYNA построены конечно-элементные математические модели заготовок изделий ВКМ под последующую гибку и обкатку.

Следует отметить, что пока еще не каждая модель процессов ОМД может быть реализована, а время расчетов наиболее сложных моделей исчисляется сутками. Однако, учитывая темпы прогресса в области информационных технологий, можно предположить, что уже через несколько лет в стандартном арсенале рядового технолога появятся CAE-системы и аппаратное обеспечение, возможности которых позволят в режиме реального времени моделировать альтернативные схемы проектируемых процессов.

Экономические проблемы. Организация виртуальных машиностроительных предприятий. Благодаря широкому распространению современных информационных технологий в промышленности развитых стран мира складываются новые виды организационных структур, в частности так называемые виртуальные предприятия или виртуальные производственные объединения. Виртуальное производственное объединение, как правило, состоит из *агентов* – специализированных предприятий, выпускающих комплектующие изделия или производственные услуги, и *головного предприятия* – носителя бренда и системного интегратора продукции агентов, состав которых периодически меняется.

Следует отметить, что такое объединение является добровольным и не предполагает жесткого закрепления связей между предприятиями. Члены объединения связаны лишь общими экономическими интересами, а также единой информационной средой, содержащей в цифровой форме данные об изделии.

Для организации виртуальных предприятий в отрасли требуется выполнение, по меньшей мере, двух условий:

необходимо внедрение на всех предприятиях отрасли CALS-технологий, позволяющих всем участникам жизненного цикла изделий (разработчикам, производителям, эксплуатирующим и ремонтным организациям) в режиме реального времени обмениваться данными об изделиях, а именно о конструкции изделий данного типа, технологии их производства и обслуживания, а также об их эксплуатации и техническом состоянии;

необходимо наличие потенциальных агентов, т. е. специализированных предприятий-поставщиков различных комплектующих изделий и производственных услуг. Потенциальных предприятий-поставщиков комплектующих изделий и производственных услуг каждого вида должно быть несколько, чтобы головные предприятия имели возможность выбора.

14.2. Направления природосбережения при проектировании машиностроительных производств

Выбросы промышленных предприятий в атмосферу, водоемы и недра на современном этапе достигли таких размеров, что в крупных промышленных центрах превышают допустимые санитарные нормы. В отдельных случаях возможно загрязнение окружающей среды тепловыми выбросами, электромагнитными полями, ультрафиолетовыми, инфракрасными, световыми и ионизирующими излучениями. При рассмотрении вопросов, связанных с защитой окружающей среды, следует учитывать неблагоприятное влияние шума, инфразвука и вибрации на жизнедеятельность человека.

Последние зарубежные исследования показали, что все возрастающее разрушительное воздействие антропогенных факторов на окружающую среду привело ее на грань кризиса. Среди различных составляющих экологического кризиса (истощение сырьевых ресурсов, нехватка чистой пресной воды, возможные климатические катастрофы) наиболее угрожающий характер приняла проблема загрязнения невозобновляемых природных ресурсов (воздух, вода и почва) отходами промышленности, где не последнее место занимает металлургическая промышленность.

В связи с этим в современном обществе резко возрастает роль инженерной (технической) экологии, призванной на основе оценки степени вреда, приносимого природе индустриализацией производства, разрабатывать и совершенствовать инженерно-технические средства защиты окружающей среды, всемерно развивать основы создания замкнутых и безотходных технологических циклов и производств.

При литье и обработке давлением металлов и сплавов в окружающую среду выделяется ряд вредных веществ. Данные вещества, загрязняющие атмосферу, могут быть твердыми, жидкими и газообразными и оказывать вредное воздействие непосредственно при химических превращениях и после них в процессе изготовления изделий совместно с другими веществами, участвующими в процессе.

Промышленная пыль образуется в результате механической обработки исходных материалов (дробление, размол и др.), тепловых процессов (плавление, прокаливание, сушка), транспортировки сыпучих материалов (погрузка, просеивание, классификация).

Жидкие загрязняющие вещества образуются при конденсации паров, распылении и разливе жидкостей, в результате химических реакций.

Газообразные загрязнители формируются в результате химических

реакций, например, окисления, обжига руд и нерудного минерального сырья. При сжигании топлива образуется огромное количество газообразных соединений. Мощным источником загрязнения окружающей среды также являются электрохимические процессы, например производство алюминия.

Ежегодно только в цветной металлургии потребляется около 1200 млн м³ свежей воды, которая сбрасывается в гидросферу загрязненной минеральными примесями. В настоящее время существуют технологии создания замкнутого цикла использования промышленных вод, однако внедрение этих технологий требует больших капитальных затрат.

Утилизация отходов производства продолжает оставаться одной из серьезных проблем.

При условии сохранения замкнутого водооборота и решения задачи почвосбережения, наиболее загрязняемым объектом является воздушная среда.

Исследование реальных экологических ситуаций по данным контроля за антропогенными изменениями окружающей среды составляет одну из основных задач инженерно-экологического анализа природно-технической геосистемы. Можно выделить два класса задач такого анализа:

определение возможных экологических последствий на стадии формирования промышленной экосистемы (включая проектирование и производство объектов промышленного и строительного техногенеза);

определение экологических последствий на этапе функционирования искусственных объектов.

В инженерно-экологическом цикле особое место занимает проектирование с экологической ответственностью, поскольку обеспечение на этом этапе необходимого природоохранного потенциала во многом определяет закладываемый уровень экологической безопасности, а следовательно, и возможные материальные затраты на его устойчивое сохранение в процессе функционирования природно-технической геосистемы.

До настоящего времени отсутствуют единые методы природосберегающего проектирования и технологического нормирования какой-либо природно-технической системы с экологической ответственностью. Так, например, несмотря на имеющиеся технологии создания замкнутого водного цикла в металлургических и литейных цехах, проблема загрязнения атмосферы остается нерешенной и уровень техногенного воздействия снижается только при использовании широкого диапазона очистных сооружений.

Важную роль для сохранения экологического баланса играет грамотное проектирование производственных цехов. Прежде всего следует знать объем производства по видам заготовок с учетом реальной перспективы его расширения. Мощность производства всегда следует планировать с некоторым запасом по отношению к потребности обрабатывающих цехов, так как последняя обычно довольно быстро возрастает в связи с расширением производства, увеличением производительности оборудования, внедрением новых, легко обрабатываемых сплавов и др. Чаще всего отделения цеха размещают в одном здании, однако в целях предотвращения загрязнения

атмосферы необходимо размещать в изолированном помещении отделения переработки шлаков, сплавления и размола флюсов и переплава низкосортных отходов. Помещения для этих отделений должны быть оборудованы специальной вентиляцией и сооружениями для очистки выбросов. При выборе основного технического оборудования главными задачами являются обеспечение высокого качества металла и высокой производительности труда при минимальных капиталовложениях и низкой себестоимости заготовок.

Требование экологической чистоты при создании объектов и промышленных производств продиктовано необходимостью минимизации негативного воздействия на окружающую природную среду. В настоящее время разработано много технологических процессов, при которых исключаются потери и выбросы в окружающую среду отходов-загрязнителей. В таких процессах наиболее полно реализуются принципы безотходной технологии. Многочисленные экологические исследования показали, что строительством очистных сооружений невозможно полностью решить задачу по предотвращению загрязнения объектов гео- и биосферы. Более того, общество потребляет огромное количество разнообразных веществ, которые перерабатываются с большими отходами и выбрасываются в окружающую среду. Ценное сырье в ряде случаев перерабатывают по схеме так называемого однократного неполного использования, что сопровождается выбросом значительной его части со всеми отрицательными последствиями для окружающей среды.

Одним из основных условий ускорения темпов внедрения безотходной или малоотходной технологии является разработка новых инженерно-экологических принципов проектирования и организации промышленных производств, отвечающих требованиям максимальной экологической безопасности. В настоящее время отсутствие в должной мере учета экологических вопросов при проектировании объектов и технологических процессов приводит к тому, что главную нагрузку в области охраны среды в ближайшее десятилетие будут по-прежнему нести водо- и газоочистные сооружения. В лучшем случае, учитывая рост количества и мощностей указанных сооружений, повышением эффективности их работы можно будет добиться стабилизации накопления веществ-загрязнителей.

В целях ускорения темпов внедрения безотходной или малоотходной технологий в металлургии в последние годы совершенствовались конструкции и эффективность работы оборудования. Так, например, существенно усовершенствована конструкция печных горелок с целью повышения эффективности ее работы и снижения выбросов в атмосферу. При этом существенно изменились методы управления работой горелок, усовершенствованы системы компьютерного регулирования, в том числе программное обеспечение для регулирования заданного соотношения воздух/топливо и способы управления циклом настройки регенеративных горелок.

Каждый формируемый объект и промышленное производство наделены комплексом техногенных свойств, обуславливающих потенциально опас-

ный уровень антропогенных изменений природных объектов в соответствии со спецификой взаимодействия с окружающей средой.

Снижение шлакообразования – одна из основных задач совершенствования процессов управления печью и обеспечения оптимальных показателей работы печи, особенно в отношении температурного режима: повышенная температура расплавленного металла приводит к росту захвата водорода и интенсивному шлакообразованию.

С термодинамической точки зрения промышленная экосистема (типа «искусственный объект – окружающая среда», «производственный цикл – окружающая среда» и др.) находится в равновесии в том случае, если среднестатистические значения параметров ее состояния остаются постоянными в регламентированных пределах.

Направленное техногенное воздействие, являющееся внешним по отношению к экосистеме, обуславливает ответную реакцию системы, выражающуюся в плавном или скачкообразном изменении антропогенных свойств.

Таким образом, для создания экологически безопасной промышленной экосистемы при организации и планировании природоохранной деятельности на предприятии, а также при проектировании промышленной экосистемы необходимо учитывать следующие инженерно-экономические аспекты:

- проектирование безопасного оборудования;
- проектирование замкнутой промышленной экологической системы;
- комплексный подход при модернизации производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2003.
2. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
3. Жуков, Э. Л. Технология машиностроения: учеб. пособие для вузов / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин. – М.: Высш. шк., 2005.
4. Черепяхин, А. А. Технология обработки материалов: учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования / А. А. Черепяхин. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.
5. Технология конструкционных материалов: лабораторный практикум / Е. А. Астафьева, О. Ю. Фоменко, И. Ф. Редько, Ф. М. Носков. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006.
6. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов. – М.: Высш. шк., 2001.
7. Баранчукова, И. М. Проектирование технологии: учеб. для студ. машиностроит. спец. вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко. – М.: Машиностроение, 1990.
8. Баранчукова, И. М. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения: учеб. для машиностроит. спец. вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко. – М.: Высш. шк., 1999.
9. Воскобойников, В. Г. Общая металлургия / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. – М.: Металлургия, 1979.
10. Емельянова, А. П. Технология литейной формы / А. П. Емельянова. – М.: Машиностроение, 1986.
11. Кузьмин, Б. А. Технология металлов и конструкционные материалы / Б. А. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 1989.
12. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1977.
13. Титов, Н. Д. Технология литейного производства / Н. Д. Титов. – М.: Машиностроение, 1985.
14. Технология конструкционных материалов и материаловедение: метод. указания и контрольные задания для студентов-заочников машиностроит. спец. вузов / ред. Л. Н. Бухаркин. – 4-е изд. – М.: Высш. шк., 1988. – 72 с.
15. Челноков, Н. М. Технология горячей обработки материалов: учеб. / Н. М. Челноков, Л. К. Власьевнина, Н. А. Адамович. – М.: Высш. шк., 1981.
16. Прейс, Т. А. Технология конструкционных материалов / Т. А. Прейс. – М.: Высш. шк., 1991.
17. Казаков, П. Ф. Технология металлов и других конструкционных материалов / П. Ф. Казаков. – М.: Металлургия, 1976.

18. Семенов, Е. И. Ковка и штамповка: справ. / Е. И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1985.
19. Соколов, Л. Н. Теория и технологияковки / Л. Н. Соколов. – Киев: Выща. шк., 1989.
20. Охрименко, Я. М. Теория процессовковки / Я. М. Охрименко. – М.: Высш. шк., 1977.
21. Фоминых, В. П. Ручная дуговая сварка / В. П. Фоминых. – М.: Высш. шк., 1986.
22. Стеклов, О. И. Основы сварочного производства / О. И. Стеклов. – М.: Высш. шк., 1986.
23. Торхов, Н. А. Производство металлических электродов / Н. А. Торхов. – М.: Высш. шк., 1986.
24. Китаев, А. М. Справочная книга сварщика / А. М. Китаев. – М.: Машиностроение, 1985.
25. Полухин, П. И. Технология металлов и сварка / П. И. Полухин. – М.: Высш. шк., 1977.
26. ГОСТ 9466–75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация, размеры и общие технические требования.
27. ГОСТ 3.1125–88. Правила графического выполнения элементов литейных форм и отливок.
28. ГОСТ 3212–92. Комплекты модельные. Уклоны формовочные, стержневые знаки, допуски размеров.
29. Малов, М. Н. Справочник металлиста / М. Н. Малов. – М.: Машиностроение, 1977.
30. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. / ред.: А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение-1, 2003.
31. Третьяков, А. Ф. Лекции по дисциплине «Технология конструкционных материалов» [Электронный ресурс] / А. Ф. Третьяков. – М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – Режим доступа: e-mail: mt13@bmstu.ru