

Федеральное агентство по образованию
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»

Авторы:

доцент, канд.техн.наук Бражников Андрей Викторович
доцент Лаврова Наталия Борисовна
доцент Коростовенко Лариса Петровна
старший преподаватель Хомич Людмила Викторовна
ассистент Наймушин Алексей Сергеевич
доцент, канд.физ.- мат.наук Янковская Татьяна Александровна

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛО-
ГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

Красноярск- 2008г.

ВВЕДЕНИЕ

Технология конструкционных материалов - комплексная дисциплина о способах получения, переработки и обработки конструкционных материалов.

Материаловедение - прикладная наука, изучающая взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов.

Курс «Материаловедение и ТКМ» базируется на таких фундаментальных науках как «Физика твердого тела», «Химия», «Металлургия». Изучение данного курса необходимо современному горному инженеру, который должен иметь представление о возможностях современных материалов, о способах их получения, о технологии производства заготовок из этих материалов, о механической обработке конструкционных материалов с рассмотрением основ резания, электрофизических и электрохимических методов чистовой обработки.

Курс «Материаловедение и ТКМ» тесно связан с такими дисциплинами как «Технология ремонта горного оборудования», «Основы эксплуатации горных машин и оборудования», «Эксплуатация и ремонт природоохранного оборудования», Надежность горных машин и оборудования».

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Металлургия - это отрасль промышленности, которая служит для получения металлов из руды.

За несколько тысячелетий до н. э. люди начали использовать металлы, сначала самородные (медь, золото), а затем, в третьем и втором тысячелетии до н. э., научились выплавлять бронзу (сплав меди с другими металлами). Позже появилось кустарное производство железа, и стали из железной руды методом восстановления губчатого железа в твердом состоянии. В твердом же состоянии получали сталь, насыщая губчатое железо углеродом в древесном угле.

Только с XIII-XIV веков появилось производство жидкого чугуна из железной руды. Сталь выплавлять научились в XIX веке.

1.1. Современное металлургическое производство чугуна и стали

Металлургическое производство представляет собой сложный комплекс различных производств, базирующихся на месторождениях руд, коксующихся углей и энергетических мощностей. Оно включает следующие комбинаты, заводы, цехи (рис. 1.1):

1. шахты и карьеры по добыче руд и каменных углей;
2. горно-обоганительный комбинат, где подготавливаются к плавке;
3. коксохимический завод или цех, где осуществляют получение кокса из угля и извлечение из него полезных химических продуктов
4. энергетические мощности - это электростанция, цехи для получения сжатого воздуха (для дутья доменных печей) и кислорода (для кислородного конвертора);
5. доменная печь для выплавки чугуна и ферросплавов (ферросилиций, ферромарганец);
6. заводы для производства ферросплавов (для легирования специальных сталей);
7. сталеплавильные цехи (конверторный, мартеновский, электросталеплавильный);
8. прокатные цехи, в которых слитки стали, прокатывают в сортовой прокат: балки, рельсы, прутки, уголки, листы и т. д.

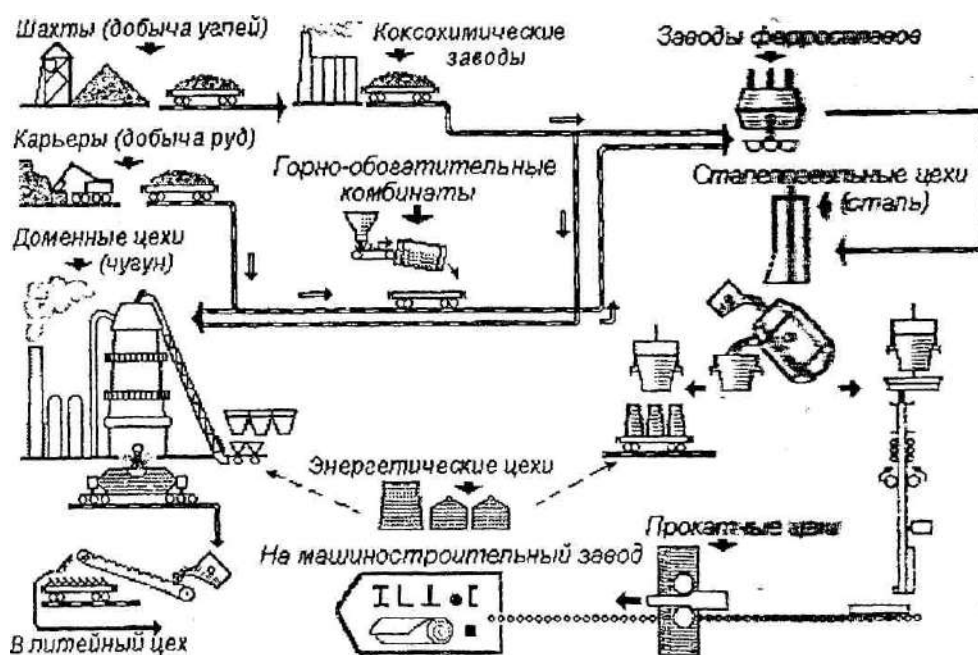


Рис. 1.1. Схема современного металлургического производства

1.2. Материалы для производства чугуна и стали

Исходными материалами для производства чугуна и стали являются:

1. Руды. 2. Флюсы. 3. Топливо. 4. Огнеупоры.

Руда - состоит из минералов, содержащих металл, и пустой породы. В минералах металлы находятся в виде химических соединений (окислы, силикаты, карбонаты, сернистые соединения).

Промышленной рудой называют горную породу, из которой при данном уровне развития техники целесообразно извлекать металлы.

Для железных руд промышленным является содержание 30-50 % железа, для медных руд - 1-5 % меди, для молибденовых руд - 0,005-0,02 % молибдена.

Железные руды содержат железо в различных соединениях.

Магнитный железняк содержит магнитную окись железа Fe_3O_2 (55-60 % железа). Наиболее крупное месторождение этой руды - Курская магнитная аномалия.

Красный железняк Fe_2O_3 содержит 55-60 % железа.

Бурый железняк содержит гидраты окислов железа $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (37-55 % железа). Остальное - пустая порода, состоящая из SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO .

Флюсы - это материалы, которые загружают в печь для образования легкоплавкого соединения с пустой породой. Это соединение называется *шлаком*. Шлак должен быть легче металла и всплывать на поверхность. Шлак играет полезную дополнительную роль в процессе плавки: он защищает жидкий металл от вредного влияния воздуха. Шлаки бывают *кислые*, если в их состав входят кислые окислы SiO_2 и P_2O_5 , и *основные*, если в их состав входят основные окис-

лы CaO , FeO и т.д.

При высоких температурах рабочего пространства печи шлаки могут взаимодействовать с футеровкой печи и выводить ее из строя. Например, если печь выложена кирпичом из основного материала, введение кислых флюсов приведет к разрушению футеровки. При плавке в печах с кислой футеровкой используют кислый флюс SiO_2 – кварцевый песок, а в печах с основной футеровкой используют известняк (CaCO_3) или доломит (CaCO_3 и MgCO_3).

Топливо - главными видами топлива в металлургических печах являются кокс, природный газ, мазут, а также доменный, или колошниковый газ.

Кокс получают в коксовых печах сухой перегонкой при температуре 1000°C (без доступа воздуха) каменного коксующегося угля. В процессе коксования угольная масса размягчается, из нее выделяются газообразные продукты, затем уголь превращается в пористую массу - кокс. Из газообразных продуктов получают бензол, фенол, каменноугольную смолу, CO_2 и другие ценные продукты.

Процесс коксования длится 14-16 часов. Затем кокс выталкивают из печи и тушат водой. Дополнительно применяются в качестве топлива природный газ, мазут.

Огнеупорные материалы. В современных металлургических печах процесс плавки ведется при высоких температурах. Поэтому внутреннюю облицовку (футеровку) печей и ковшей для разлива жидкого металла делают из огнеупорного материала.

Огнеупорные материалы делают в виде кирпичей и порошков. По химическим свойствам огнеупоры подразделяются на кислые, основные и нейтральные.

Материалы, содержащие большое количество кремнезема SiO_2 , называются *кислыми* (динасовый кирпич). Материалы, содержащие основные окислы CaO и MgO , называются *основными* (магнезитовый, доломитовый кирпич).

Материалы, содержащие большое количество Al_2O_3 и Cr_2O_3 , называются *нейтральными* (шамотный хромомagneзитовый кирпич). Углеродистый кирпич содержит до 92 % C. Магнезитовые кирпичи имеют огнеупорность более 2000°C . Доломитовые - до 2000°C . Шамотный кирпич (нейтральный) имеет огнеупорность до $1580-1730^\circ\text{C}$.

1.3. Производство чугуна

Выплавка чугуна производится в доменных печах. Сущность процесса получения чугуна заключается в восстановлении чистого железа из окислов, входящих в состав руды, с помощью твердого углерода при температурах ниже температуры плавления железа. При этом из руды получается твердое губчатое железо. Затем губчатое железо насыщается углеродом, при этом температура плавления его понижается, и оно переходит в жидкое состояние в виде чугуна.

1.3.1. Технология доменной плавки

Послойная загрузка шихты и кокса в доменную печь:

- горение топлива;
- восстановление железа из руды;
- науглероживание железа и его расплавление;
- восстановление кремния и марганца и переход их в образующийся чугун;
- шлакообразование;
- удаление серы;
- выпуск шлака и жидкого чугуна;
- разливка чугуна на чушки или транспортировка в жидком состоянии для передела в сталь.

1.3.2. Устройство и работа доменной печи

Доменная печь (рис. 1.2) - печь шахтного типа. Имеет снаружи стальной кожух, выложенный изнутри огнеупорным шамотным кирпичом. Рабочее пространство печи включает колошник 6, шахту 5, распар 4, заплечики 3, горн 1, лещадь 15. В верхней части колошника находится засыпной аппарат 8, через который в печь загружают шихту слоями (*колошами*). Шихта состоит из обогащенной руды (концентрата) в виде кусков размером 30-50 мм, кокса и флюсов. Из мелких фракций руды предварительно готовят агломерат или окатыши. *Агломерат* получают путем спекания на агломерационной фабрике мелких (менее 10 мм) частиц концентрата с коксом и флюсом. *Окатыши* получают из пылевидных фракций путем окомкования в шарики размером 30 мм и обжига.

Взвешенные порции шихты и кокса с помощью вагонетки 9 скипового подъемника по наклонному мосту 12 поднимаются к засыпному аппарату 8, где опрокидываются в приемную воронку 7. При опускании малого конуса 10 шихта попадает в чашу 11. После чего малый конус закрывается, опускается большой конус 13, и шихта попадает в печь. Такая последовательность работы механизмов засыпного аппарата необходима для предотвращения выхода колошниковых газов из доменной печи в атмосферу.

Все механизмы засыпного аппарата, скипового подъемника и вагон-весов работают автоматически по заданной программе. В процессе работы печи ших-

9

та постепенно опускается, а новые порции шихты постоянно добавляются. В верхней части горна находятся фурменные устройства 14 для подачи через фурмы 2 нагретого воздуха, необходимого для горения кокса. По мере скопления чугуна и шлака их выпускают из печи: чугун - через чугунную летку 17, а шлак через шлаковую летку 16.

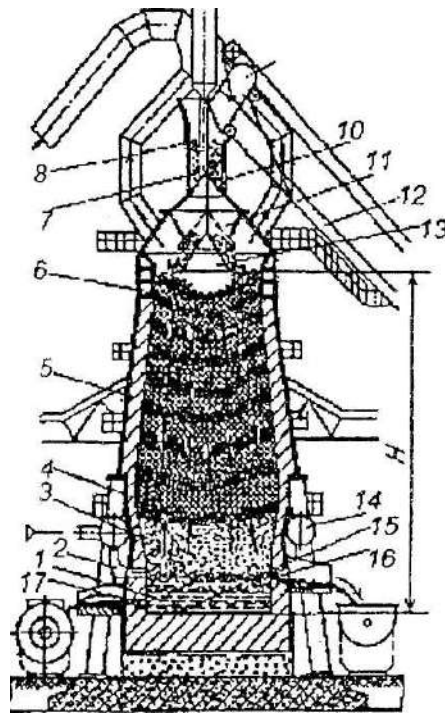


Рис. 1.2. Схема устройства доменной печи

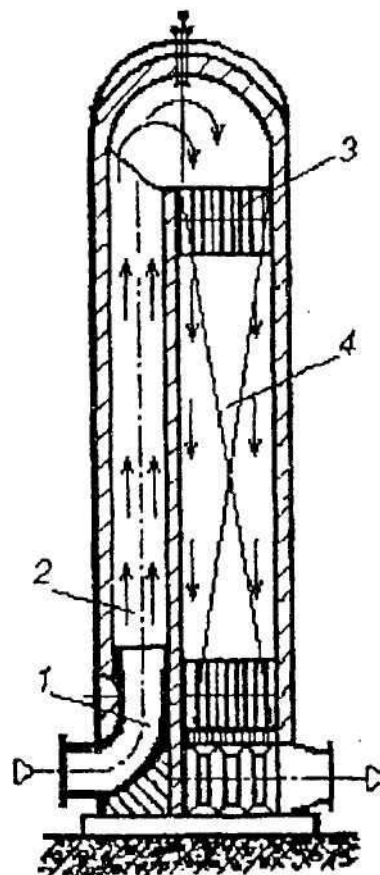


Рис. 1.3. Схема устройства воздухонагревателя

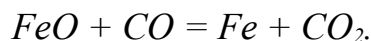
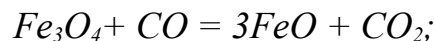
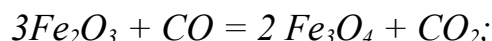
Доменная печь может работать только на нагретом до 1000°C воздухе. Нагретый воздух, необходимый для горения кокса, поступает в печь через фур-

мы из воздухонагревателей. Внутри воздухонагревателя (рис, 1.3) имеется камера сгорания 2 и насадка 4. Насадка выложена из огнеупорных кирпичей 3 так, что между ними образуются вертикальные каналы. В нижнюю часть камеры сгорания к горелке 1 подается очищенный от пыли колошниковый газ, который сгорает и, проходя через насадку, нагревает ее. Затем подача газа к горелке прекращается, и через насадку пропускается холодный воздух. Воздух, проходя через воздухонагреватель, нагревается до 1000-1200°C и поступает через фурмы в доменную печь. 1.3.3. Реакции металлургического процесса доменной печи.

1. Горение топлива. В нижних зонах печи на уровне фурм происходит горение кокса $C + O_2 = CO_2$. При этом температура повышается до 2000°C. Углекислый газ, взаимодействуя с коксом, восстанавливается до окиси углерода: $CO_2 + C = 2CO$. При использовании природного газа дополнительно выделяются CO и H_2 .

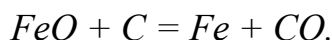
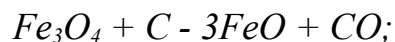
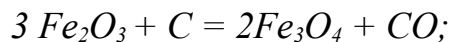
2. Восстановление железа. Окись углерода и углерод имеют большее сродство к кислороду, чем железо. Поэтому, уже начиная с температуры 600 °C, углерод, окись углерода и водород отбирают кислород у твердых окислов железной руды, восстанавливая чистое губчатое железо в твердом состоянии.

Восстановление железа идет по реакциям:



Это так называемое *косвенное восстановление* протекает при температурах 500-900 °C.

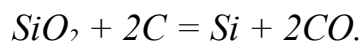
При температурах 900-1100 °C происходит *прямое восстановление* железа углеродом:



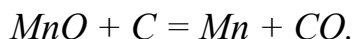
3. Восстановленное железо получается в виде твердой губчатой массы. Соприкасаясь с углеродом кокса и реагируя с окисью углерода, железо насыщается углеродом. Температура его плавления понижается, и науглероженное железо переходит в жидкое состояние. Стекая вниз по кускам раскаленного кокса, железо дополнительно науглероживается и в

виде чугуна накапливается в горне печи.

3. Параллельно с восстановлением железа восстанавливаются углеродом кремний и марганец. Кремний восстанавливается из пустой породы:



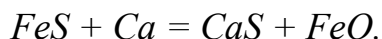
Марганец - из руды:



4. Марганец и кремний растворяются в железе, легируя чугун.

5. Пустая порода, зола топлива и флюсы образуют легкоплавкое соединение, не смешивающееся с чугуном - шлак. Шлак легче чугуна и поэтому находится на поверхности.

6. Взаимодействие флюса CaO с серой, находящейся в чугуне в виде FeS, частично переводит ее в шлак:



Фосфор полностью остается в чугуне. Окончательное удаление серы и фосфора происходит при переплавке чугуна в сталь. По мере скопления чугуна и шлака их выпускают из печи. Шлак – через шлаковую летку в шлаковую чашу. Чугун спускают через чугунную летку в чугуновозный ковш. Емкость чугуновозных ковшей 90-140 т. В них чугун транспортируется в сталеплавильный цех для передела в сталь или на разливочные машины, где его разливают в формы. Чугун в них затвердевает в виде слитков - *чушек* весом 45 кг. Часто шлак не сливают в шлаковые чаши, а для удобства использования подвергают жидкой грануляции: на него направляют струю воды, под действием которой он рассыпается на мелкие гранулы.

1.3.4. Продукты доменной плавки

В доменных печах получают три продукта: чугун, шлак и колошниковый газ.

Чугун - главный продукт доменной плавки. В зависимости от назначения получают чугун разного химического состава.

1. *Передельный чугун* выплавляют для передела его в сталь в конверторах или мартеновских печах. Он содержит 4 % C; 0,6 % Si; до 1 % Mn; до 0,3 % P; до 0,07 % S.

Передельный чугун выплавляют трех видов:

а) коксовый М1, М2, М3, Б1, Б2;

б) фосфористый МФ1, МФ2, МФ3;

в) высококачественный ПВК1, ПВК2, ПВК3.

Чугуны М1-М3 предназначены для мартеновских печей, Б1 и Б2 – для бессемеровских конверторов;

МФ1-МФ3 - фосфористые чугуны для мартеновской печи;

ПВК1-ПВК3 - переделные высококачественные чугуны.

По содержанию вредных примесей Р и S чугуны разделяются:

а) по фосфору - на классы А, Б и т. д.

б) по сере - на категории I, II, и т. д.

2. *Литейный чугун* применяется для получения литых деталей. Марки ЛКО, ЛК1 - ЛК5 имеют повышенное содержание кремния для увеличения жидкотекучести.

Для художественного литья применяют фосфористые чугуны, содержащие до 1,2 % Р.

3. *Доменные ферросплавы* - это сплавы Fe с Si, Mn или с другими металлами. Они применяются для легирования и раскисления стали.

а) Зеркальные чугуны 341, 342, 343 содержат до 10-25 % Mn.

б) Доменный ферромарганец Мн6, Мн7 содержит до 70-75%Mn.

в) Доменный ферросилиций Си 10, Си 15 содержит 9-13 % Si и до 3 % Mn.

Шлак и колошниковый газ являются побочными продуктами доменной плавки.

Гранулированный шлак используют для производства цемента, шлаковых строительных кирпичей и блоков, щебня, шлаковаты и других строительных материалов. Применяются также литые шлаковые изделия.

Колошниковый газ содержит значительное количество горючих составляющих (26-32 % CO, до 4 % H₂), его теплотворная способность 850-950 кал/м³. Поэтому после очистки от пыли он используется для нагрева воздуха (в воздухонагревателях), а также в качестве топлива в цехах металлургического завода.

13.5. Техничко-экономические показатели доменной печи

Основным показателем эффективности доменного процесса является *коэффициент использования полезного объема* печи (КИПО), равный отношению полезного объема печи в м³ к среднесуточной выплавке чугуна в тоннах. КИПО современных доменных печи приближается к 0,4м³/т.

Важным показателем доменной плавки является *удельный расход кокса* на одну тонну выплавляемого чугуна, он составляет 450-550 кг/т.

1.4. Производство стали

1.4.1. Сущность процесса

1. Во всем мире сталь изготавливают из перепельного чугуна и стального лома (скрапа).

2. Сталь отличается от чугуна более низким содержанием углерода (менее 2,14 %) и примесей (P, S, Mn, Si и др.)

3. При переделе чугуна в сталь углерод удаляют путем его окисления при продувке через жидкий чугун воздуха или кислорода.

4. Примеси MnO , SiO_2 , P, S удаляют путем перевода их в шлак.

5. Сталь в процессе получения насыщается кислородом.

Сталь, содержащая кислород, непригодна для обработки давлением (ковки, прокатки), т. к. в ней образуются трещины при деформации в нагретом состоянии.

6. Для удаления кислорода из стали в процессе плавки ее раскисляют, т.е. вводят в нее элементы с большим сродством к кислороду (Mn и Si в виде ферросплавов и металлический Al).

7. Раскисление является завершающим этапом выплавки стали.

Сталь производят в различных металлургических агрегатах, имеющих разный принцип действия: конверторы, мартеновские печи, электропечи.

1.4.2. Производство стали в конверторах

Конвертор представляет собой сосуд грушевидной формы. Снаружи конвертор обшит стальными листами, внутри выложен огнеупорным материалом (футеровка). Заливка чугуна и завалка скрапа производится через горловину; разливка стали - через лоток.

Различают три вида металлургических процессов при выплавке стали в конверторах: бессемеровский процесс, томасовский процесс и кислородно-конверторный процесс. Соответственно различают бессемеровский, томасовский и кислородный конверторы.

В бессемеровских конверторах (кислый конвертор) футеровка выложена из кислых огнеупоров (динасовый кирпич). В томасовских конверторах футеровка выложена из основных огнеупоров (доломитовый кирпич).

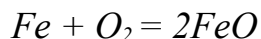
Кислая футеровка выдерживает 1000-2000 плавов, а основная - 300-400. Днище конвертора меняют чаще, так как оно разрушается быстрее. Кислородные конверторы обычно имеют основную магнезитовую футеровку.

Бессемеровский процесс. При этом процессе производства стали используют чугун с высоким содержанием кремния (до 2 %) и марганца (до 1,5 %) и минимальным количеством серы и фосфора. Плавка в бессемеровском конверторе состоит из следующих периодов:

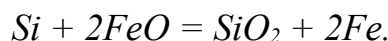
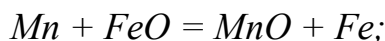
1. Завалка скрапа.

2. Заливка жидкого чугуна.

3. Продувка воздуха снизу и образование шлака (период искр). При продувке кислород воздуха вступает в реакцию с железом:

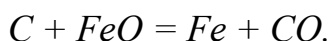


Образующаяся закись железа переходит в шлак и растворяется в жидком металле, где окисляет марганец и кремний:



Окислы марганца и кремния переходят в шлак. В этот период металл сильно разогревается, из конвертора вылетают вместе с газами капельки жидкого чугуна, образующие в воздухе искры.

4. Этот период начинается с выгорания из чугуна углерода:



Окись углерода сгорает в воздухе, образуя над горловиной яркое пламя.

5. В последний период над горловиной конвертора появляется бурый дым. Это значит, что все примеси окислились, перешли в шлак и начинает окисляться железо. Это означает конец плавки. Конвертор наклоняют в горизонтальное положение, сливают шлак и вводят раскислители: ферромарганец и ферросилиций или алюминий. Готовую сталь через летку конвертора сливают в ковш. Перед заливкой в конвертор чугун некоторое время выдерживают в больших футерованных сосудах - миксерах - для усреднения его химического состава, регулирования температуры и частичного обессеривания (в бессемеровском конверторе невозможно удалять серу).

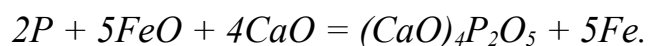
Томасовский процесс. Наличие громадных месторождений полезных руд с большим количеством фосфора вызвало необходимость выплавки стали из фосфористых чугунов. При томасовском способе футеровка конвертора основная. Это позволяет получать основные шлаки, необходимые для удаления фосфора.

В конвертор засыпают свежесожженную известь (CaO), а затем заливают чугун с высоким содержанием фосфора (1,6-2,0 %), минимально возможным содержанием кремния (до 0,6 %) и серы (до 0,076 %).

Производят продувку воздухом (как и при бессемеровском процессе).

При этом окисляются железо, кремний, марганец и образуется основной шлак. Температура металла повышается, но фосфор из него еще не удален. В следующий период происходит выгорание углерода до 0,1-0,2 % и снижение температуры металла до 1400 °С. После этого начинается интенсивное удале-

ние фосфора, т. е. его окисление и ошлакование:



Температура при этом повышается до 1600 °С. Перед введением в сталь раскислителей из конвертора необходимо удалить шлак. В противном случае фосфор восстановится из шлака и перейдет обратно в металл.

Томасовские шлаки содержат до 24 % P_2O_5 ; их применяют в сельском хозяйстве в качестве удобрения.

Кислородный конвертор представлен на рис. 1.4. Сверху он имеет стальной кожух 3, выложенный изнутри основным огнеупорным кирпичом 4 (магнезитовым или доломитовым). Конвертор выполнен поворотным на цапфах 5, что необходимо для загрузки скрапа, заливки чугуна и слива шлака и готовой стали. Фурма 1 вставляется через горловину 2. Емкость конвертора составляет 130-350 т. жидкого металла.

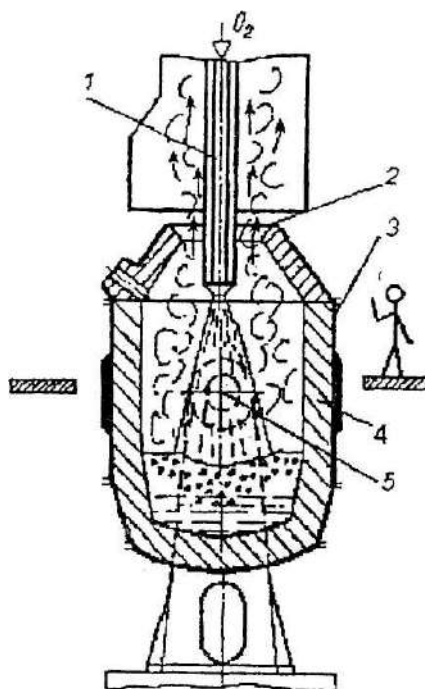


Рис. 1.4. Схема устройства кислородного конвертора

Кислородный конвертор был создан в XX веке в связи с бурным развитием металлургии. Конвертор позволяет увеличить производительность, а главное - снизить содержание азота в готовой стали до 0,005-0,004 % вместо 0,02 % при воздушном дутье (рис. 1.5).

Металлургические процессы при выплавке стали в кислородном конверторе

Шихтовые материалы вводят через горловину конвертора: в первую очередь скрап, а затем заливают чугун. Количество стального лома составляет 25-30 % от массы чугуна. Чугун должен содержать 3,7-4,4 % углерода; 0,5-1,5 % марганца; 0,5-1,5 % кремния; 0,03-0,08 % серы и не более 0,3 % фосфора. Температура заливаемого чугуна должна быть 1250-1400 °С. После ввода исходных шихтовых материалов внутрь конвертора через горловину вводят кислородную фурму и начинают подавать кислород. Одновременно с началом продувки и далее по мере надобности в конвертор загружают шлакообразующие материалы.

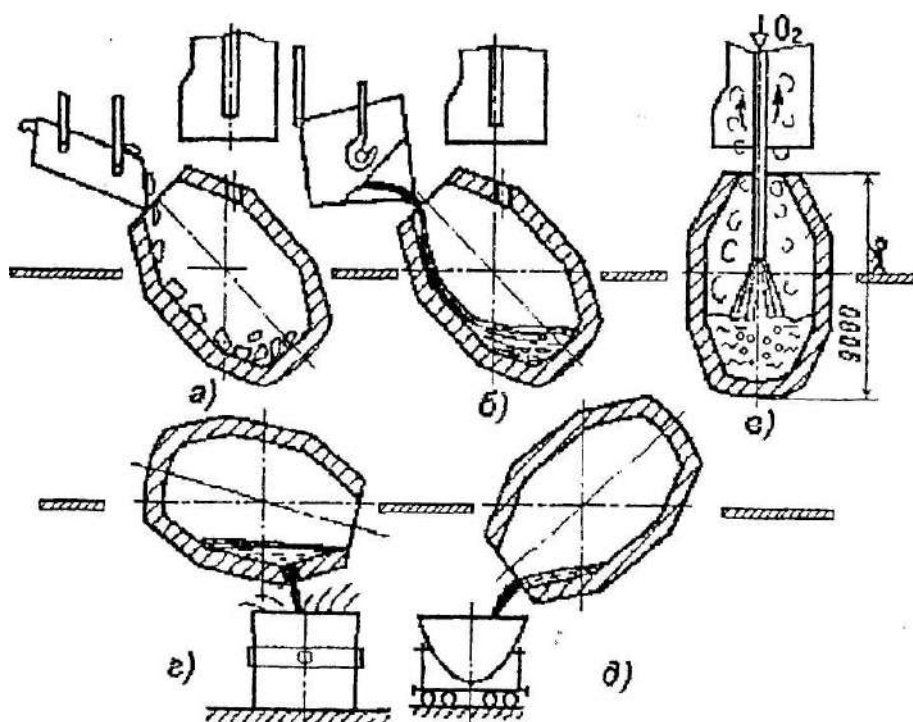
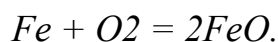


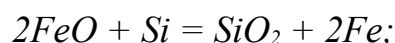
Рис. 1.5. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конверторах

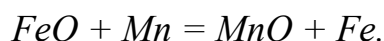
В зоне контакта кислородной струи (давление 9-14 атмосфер) кислород окисляет все примеси, однако наиболее интенсивно окислятся железо:



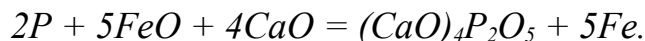
Закись железа переходит в сталь и в шлак.

После этого закись железа FeO , растворенная в металле, вступает в реакцию с примесями и удаляет их в шлак:



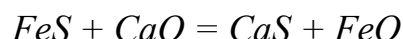


Удаление фосфора происходит путем окисления и ошлакования:



Образовавшийся фосфат кальция легче жидкого металла, поэтому всплывает на поверхность и удаляется в шлак. При повышенном содержании фосфора (более 0,15 %) производят промежуточный слив шлака, и наведение нового путем загрузки извести.

Удаление серы происходит по реакции:

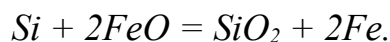
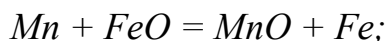


с переходом CaS в шлак.

Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода в металле будет соответствовать заданному содержанию в стали. При излишке марганца и кремния делают кратковременную додувку; при излишке высокой температуре загружают стальной лом. Готовая сталь должна иметь температуру 1580-1650 °С.

Для уменьшения содержания кислорода производят раскисление стали.

Для этого при выпуске стали из конвертора в ковш добавляют ферромарганец, ферросилиций и чистый алюминий. Раскисляющие элементы, соединяясь с кислородом, образуют нерастворимые окислы, всплывающие в шлак:



Легированные стали трудно выплавлять в конверторах, т. к. они быстро окисляются. Поэтому легирующие элементы при выплавке легированных сталей, для предотвращения их выгорания, вводят в виде ферросплавов в ковш, чаще всего расплавив предварительно в электропечи. После этого в ковш выливают готовую сталь.

Технико-экономические показатели конверторного процесса

Плавка в конверторе емкостью 130-300 т заканчивается через 25-50 минут. Производительность конвертора емкостью 300 т составляет 400-500 т стали в час, а в мартеновских и электропечах - не более 80 т/час.

Расход кислорода колеблется в пределах от 1,8 до 4 м³ на тонну стали.

Область применения:

Конверторная сталь самая дешевая и низкокачественная, однако, выплавляется в больших количествах. В связи с трудностью ввода в конвертор легирующих элементов, особенно легкоокисляющихся, в них выплавляют углеродистые и низколегированные (с содержанием легирующих элементов около 2-3 %) конструкционные и инструментальные стали.

1.4.3. Производство стали в мартеновских печах

Мартеновская печь была разработана в 1865 г. французскими металлургами Э. Мартеном и его сыном П. Мартеном. *Мартеновская печь* (рис. 1.6) - это пламенная отражательная регенеративная печь.

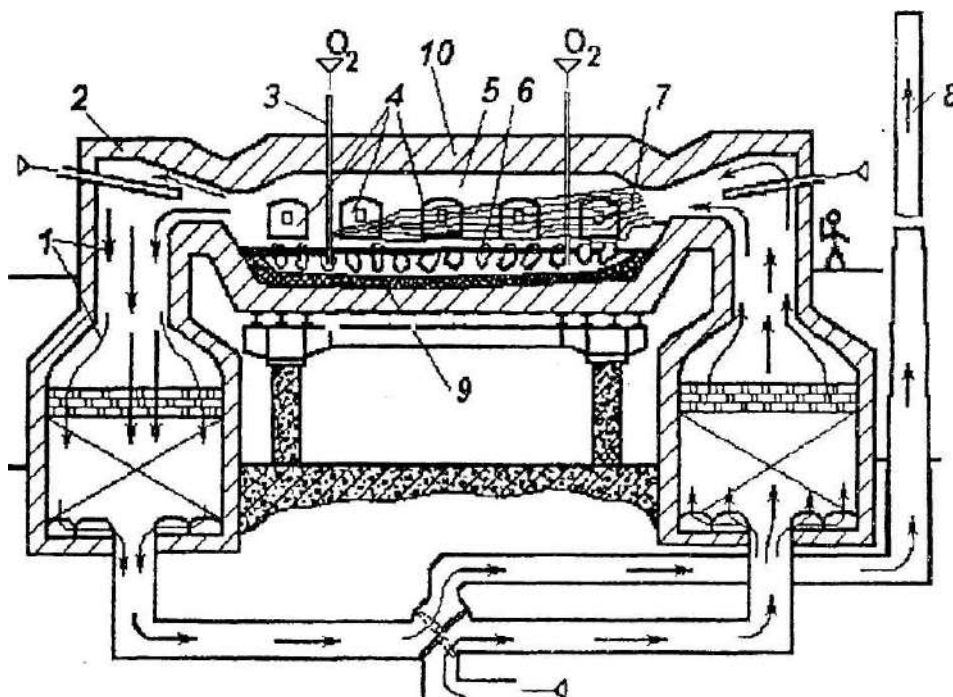


Рис. 1.6. Схема мартеновской печи

Работает на газообразном (природный газ) или жидком топливе (мазут). Она имеет рабочее пространство 5, ограниченное снизу подиной 9, сверху - сводом 10, а с боков - передней и задней стенками. Подина имеет форму ванны. Футеровка печи может быть основной и кислой. Если в процессе плавки стали в шлаке преобладают основные окислы, процесс называется *основным мартеновским процессом* (футеровка должна быть основной), а если преобладают кислые окислы - *кислым* (футеровка должна быть кислая). Футеровку основной мартеновской печи изготавливают из магнезитового кирпича, а верхний рабочий слой подины набивают магнезитовым порошком. В передней стенке печи находятся загрузочные окна 4 для подачи шихты в печь. В задней стенке печи имеется летка для слива стали. Перед плавкой летку заделывают малоспекающимися огнеупорами.

Для подогрева воздуха при работе на газообразном топливе печь имеет

два регенератора 1. Регенератор представляет собой камеру, в которой размещена насадка - огнеупорный кирпич, выложенный в клетку.

Температура отходящих из печи газов составляет 1500-1600 °С. Попадая в регенераторы, они нагревают насадку до 1250-1280 °С, а охлажденные до 500-600 °С газы уходят в заводскую трубу 8. Нагретый воздух поступает в головку печи 2, где смешивается с топливом и образует факел 7, направленный на шихту 6.

После охлаждения правого ' регенератора происходит переключение клапанов, и поток газов в печи изменяет направление. Теперь воздух поступает через левый регенератор, а правый становится на нагрев.

Емкость мартеновских печей колеблется в широких пределах. Для выплавки небольшого количества стали используют малые печи емкостью 30-80 т.

В России на металлургических заводах используются печи на 250-500 т с размером ванны до 20 м × 6 м.

Редко бывают печи-монстры емкостью до 900 т. Чем крупнее печь, тем выше ее экономическая эффективность.

Продолжительность плавки в малых печах составляет 3-6 час, в средних - до 12 час. Мартеновская печь работает непрерывно до остановки на капитальный ремонт через 400-600 плавов (кампания печи).

Шихта для мартеновских печей состоит из следующих компонентов:

1. Доменный передельный чугун марок М1, М2, М3 в жидком состоянии или в виде чушек.
2. Стальной скрап.
3. Флюс.
4. Раскислители.

Разновидности мартеновского процесса

Мартеновские печи и, соответственно, процессы плавки в них могут быть основными и кислыми.

Мартеновскую сталь выплавляют, главным образом, основным процессом, который разделяется на скрап-процесс и скрап-рудный процесс.

1. *Скрап-процесс*, при котором основную массу шихты составляет скрап с добавкой чушек чугуна, применяется на малых печах (до 100 т) на машиностроительных заводах, где нет доменных печей.

2. *Скрап-рудный процесс*, при котором основная часть шихты состоит из жидкого чугуна (до 75 %), а твердая часть - из скрапа и руды, применяется на средних и крупных печах на металлургических заводах, где есть доменные печи.

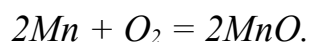
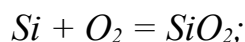
Кислый мартеновский процесс применяется в небольших печах с кислой футеровкой, где нельзя использовать известь, следовательно, удалять из металла серу и фосфор. Поэтому требуется очень чистая шихта по S и P. Это дорого.

Мартеновский основной скрап-процесс металлургии разделяют на ряд периодов плавки стали.

1. Заправка печи проводится перед каждой очередной плавкой. Она заключается в ремонте (заделке) повреждений подины. В эти места - щели, трещины - насыпают магнезитовый или доломитовый порошок.

2. Завалка (загрузка) шихтовых материалов осуществляется через загрузочные окна завальными машинами (скрап, известняк и чугун в чушках).

3. Период плавления. При плавлении чугуна и скрапа Si и Mn чугуна окисляются почти полностью избыточным кислородом печных газов:

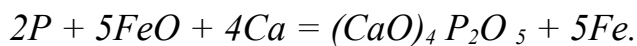


Известь тоже разлагается:



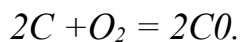
Образуется слой шлака из окислов, и окисление металла непосредственно кислородом пламени прекращается.

В период плавления создаются благоприятные условия для удаления фосфора.



Эта реакция называется процессом дефосфорации.

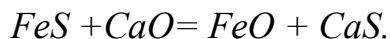
3. Период кипения ванны. Для этого в печь подают некоторое количество железной руды или вставляют сверху фурму 3 и продувают ванну кислородом. Происходит интенсивное выгорание из стали избытка углерода с образованием угарного газа:



Пузырьки CO всплывают на поверхность, и ванна начинает «кипеть». При этом шлак вспенивается, начинает увеличиваться в объеме и выливается через одно из окон в шлаковый ковш. Эта реакция называется главной в мартеновской плавке, т. к. из-за энергичного перемешивания металла:

- а) выравнивается температура металла в ванне;
- б) за счет выгорания углерода происходит доводка химического состава стали по углероду;
- в) пузырьки CO, поднимаясь на поверхность, захватывают с собой вредные газы N₂ и H₂ и шлаковые капли. Чистота стали повышается;
- г) выравнивается химический состав стали.

5. Рафинирование стали - это процесс удаления серы. Наиболее хорошо происходит в конце периода кипения. При так называемом чистом кипении, когда шлак почти вылился, продувка кислородом прекращается, и ванна продолжает кипеть за счет остатков растворенного кислорода:



Этому способствует наличие большого количества СаО в шлаке (45-50 % СаО), уменьшение количества закиси железа FeO, нагрев металла до самой высокой температуры. Если в шлаке и стали будет много FeO, то по закону действующих масс реакция не пойдет.

Начиная с расплавления шихты, до выпуска стали из печи, регулярно отбирают пробы металла и шлака для химического экспресс-анализа состава. Если содержание углерода, S и P соответствует заданному, приступают к раскислению стали. Если нет, то снова подают в печь флюс, производят продувку стали кислородом, вспенивают шлак, скачивают его в ковши, при этом происходит снижение содержания C, S и P. Иногда вместо кислорода подают в печь чистую по сере и фосфору РУДУ.

6. Раскисление металла производят в два этапа: а) за счет подачи в печь ферромарганца и ферросилиция; б) окончательно - в ковше при разливке стали, предварительно засыпав в ковш порцию алюминия и ферросилиция.

Основным скрап-процессом, как правило, выплавляют спокойную, качественную сталь. При выплавке легированных сталей легкоокисляющиеся легирующие элементы (Cr, V, Ni и Mo) в виде ферросплавов вводят в ванну после раскисления.

Технико-экономические показатели мартеновского процесса

Эффективность получения стали в мартеновских печах оценивается *средним съемом стали* с 1 м² площади пода в сутки *к расходу топлива* на тонну выплавляемой стали. Средний съем стали в современных мартеновских печах составляет около 10 т/м² в сутки, а расход условного топлива - около 80 кг/т стали.

Дополнительными характеристиками мартеновской плавки являются расход кислорода на тонну стали, расход жидкого чугуна в кг/т, и себестоимость одной тонны стали.

Область применения:

Мартеновской плавкой получают углеродистые стали и ряд марок легированных сталей. При этом основным скрап-рудным процессом преимущественно получают углеродистые стали, т. к. чугун, известняк и железная руда вносят в металл много вредных примесей. Наиболее качественную, чаще всего легиро-

ванную, сталь получают основным скрап-процессом без применения руды. Вместо руды в этом случае для проведения реакции вспенивания применяют кислород. Кислый мартеновский процесс позволяет получать как углеродистые, так и легированные стали, но требует сверхчистого по сере и фосфору металлолома в большом количестве (до 50 % от массы чугуна).

1.4.4. Производство стали в электропечах

Производство стали, в электропечах имеет ряд преимуществ по сравнению с другими плавильными агрегатами. В электропечах можно быстро нагревать и плавить металл, выплавлять высококачественные стали.

Электропечи используют для выплавки конструкционных сталей ответственного назначения, высоколегированных инструментальных, нержавеющей и др. специальных сталей.

Электроплавильные печи бывают дуговыми и индукционными.

Выплавка стали в электрических дуговых печах

Процесс электродуговой выплавки стали появился в конце XIX – начале XX века. В этих печах в качестве источника тепла используют электрическую дугу, возникающую между электродами и металлической шихтой.

Емкость дуговых печей колеблется от 0,5 до 400 т. Рабочее напряжение в малых печах 100-200 В, в больших - 400-600 В. Сила тока до десятков тысяч ампер. Длина дуги регулируется автоматически. Электропечи бывают с основной и кислой футеровкой.

В металлургических цехах обычно используют печи с основной футеровкой, в литейных - с кислой. Однако большая доля электростали выплавляется в основных печах. Применяют два вида технологии плавки в основных печах: на углеродистой шихте и на легированной.

Дуговая электросталеплавильная печь (рис. 1.7) питается трехфазным переменным током, имеет три электрода 9, изготовленных из графитизированной массы. Электрический ток от трансформатора подается гибкими кабелями 7 к электрододержателям 8. Между электродами и шихтой 3 горят дуги 13. Рабочее напряжение 180-600 В, сила тока 1-10 к А. Во время работы печи длина дуги регулируется автоматически путем вертикального перемещения электродов.

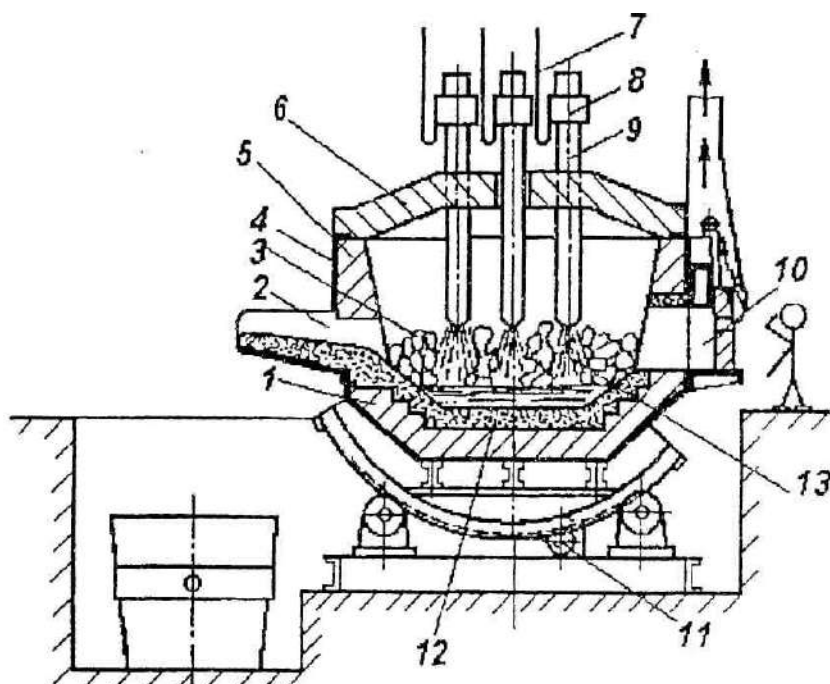


Рис. 1.7. Схема дуговой электрической плавильной печи

Снаружи печь имеет стальной кожух 4, изнутри футерована огнеупорным кирпичом 1 (основным - магнезитовым, или кислым - диновым). Подина печи набивается огнеупорной массой 12. Печь имеет стенки 5 и свод 6 (съемный). Для ведения плавки имеется рабочее окно 10, для слива металла - желоб 2. Печь можно наклонять с помощью механизма 11.

Плавка на углеродистой шихте чаще применяется для производства конструкционных углеродистых сталей и имеет много общего с мартеновским скрап-процессом.

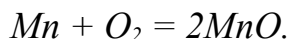
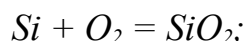
Шихта состоит из 90 % стального скрапа и 10 % передельного чугуна М1 или М2. Флюс - известь. Шихта должна быть чистой по сере и фосфору. Плавка состоит из следующих периодов:

1. Заправка печи.
2. Завалка шихты. В старых печах шихту загружают через рабочие окна

завалочными машинами. В новых крупных печах шихта загружается сверху. Для этого свод поднимается и отводится в сторону.

После загрузки электроды опускают, под них подкладывают куски кокса (для облегчения зажигания дуги) и включают ток. При опускании электродов в шихте проплавляются колодцы.

3. Образуется шлак, как и в мартеновской печи:



4. Окислительный период (в мартеновском процессе это период кипения)

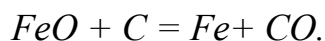
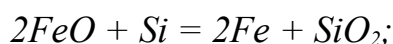
ния).

После расплавления металла и шлака и нагрева ванны до 1500 °С в печь загружают железную руду и известь. Содержащийся в руде кислород интенсивно окисляет углерод и вызывает кипение ванны: $C + O_2 = 2CO$. Шлак вспенивается, уровень его повышается. Для выпуска шлака печь наклоняют в сторону рабочего окна, шлак стекает в шлаковую чашу. Кипение ускоряет нагрев ванны, удаление из металла газов, неметаллических включений, способствует удалению фосфора. Шлак удаляют, руду и известь добавляют 2-3 раза, пока не доведут содержание фосфора в стали до 0,01 %.

5. Восстановительный период плавки включает раскисление металла и удаление серы, а также доводку химического состава стали до заданного. Раскисление электростали, в отличие от мартеновской и конверторной стали, производят комбинированным путем: глубинным (осаждающим) и диффузионным.

Для *глубинного раскисления* в печь загружают ферромарганец, ферросилиций и алюминий.

Затем металл раскисляют *диффузионным способом*. Сущность его заключается в следующем: раскисляют не металл, а шлак, восстанавливая в нем FeO:



В соответствии с законом действующих масс, уменьшение содержания оксида FeO в шлаке вызывает его интенсивный диффузионный переход из металла в шлак, чем и обеспечивается раскисление металла. Этот метод позволяет почти полностью раскислить металл. Процесс протекает в шлаке и на границе шлак - металл. При этом металл не загрязняется неметаллическими включениями. Удаление серы в виде CaS обеспечивается значительно лучше, чем в мартеновской печи. Это объясняется высокой основностью шлака и хорошей раскисленностью шлака и металла. Эти условия необходимы, чтобы протекала реакция рафинирования металла: $FeS + Ca = FeO + CaS$.

По ходу восстановительного периода берут пробы для определения химического состава стали. После этого следует выпуск металла из печи в ковш.

При выплавке легированных сталей по этой технологии в сталь вводят легирующие элементы в виде ферросплавов. Порядок ввода определяется сродством легирующих элементов к кислороду. Никель, молибден, вольфрам и другие не окисляющиеся в ходе плавки элементы вводят в период плавления или в окислительный период. Хром - легко окисляющийся элемент - вводят в восстановительный период. Кремний, ванадий, титан - наиболее сильно окисляющиеся элементы - вводят перед выпуском в ковш.

Плавку на легированной шихте производят из отходов легированных сталей (например, быстрорежущую сталь выплавляют из отходов быстрорежущей

стали; нержавеющей сталь - из отходов нержавеющей стали). По сути, это переплав. После расплавления шихты металл доводят (если требуется) до химического состава (добавляют углерод, ферросплавы). В процессе плавки в жидкую сталь может попасть кислород из воздуха и из загрязненной шихты. Производят его удаление путем раскисления ферромарганцем, ферросилицием, алюминием, ферротитаном и выпускают сталь в ковш, т. е. нет периодов кипения, дефосфорации, рафинирования, восстановления.

Кислый процесс в электродуговых печах имеет те же особенности, что и кислый процесс в мартеновских печах, т. е. для выплавки используют чистую по сере и фосфору шихту. В качестве флюса используют песок SiO_2 .

Кислая футеровка обладает значительно большей стойкостью и дешевле основной. Кислые печи применяются, главным образом, в литейных цехах.

Технико-экономические показатели выплавки стали в электрических дуговых печах

Эти показатели плавки зависят от емкости печи и технологии плавки. К показателям, характеризующим эффективность электроплавки, относятся: *производительность*, т/сутки на каждые 1000 Вт, *мощность трансформатора*, *расход электроэнергии* на 1 т выплавленной стали и *расход электродов* на тонну стали.

Производительность дуговых печей составляет 12-15 т/кВт сутки. Расход электроэнергии на 1 т стали с увеличением емкости печи уменьшается.

Например, для печи емкостью 25 т расход составляет 750 кВт·ч., а для печи емкостью 100 т - 575 кВт·ч. Расход графитизированных электродов составляет 6-9 кг/т выплавленной стали.

Область применения:

Выплавка в электродуговых печах применяется на металлургических и крупных машиностроительных заводах для всех марок сталей и специальных сплавов, но главным образом - для получения высококачественных легированных сталей и сплавов.

Выплавка стали в индукционных печах

Эти печи являются основными плавильными агрегатами в машиностроении. Они существенно отличаются от дуговых печей способом образования тепла для расплавления металла.

Индукционная высокочастотная плавильная печь (рис. 1.8) состоит из огнеупорного плавильного тигля 4 и индуктора 3, имеет съемную крышку 2. Индуктор выполнен в виде катушки из медной трубки, охлаждаемой водой. Ток подается по гибким шинам через печные конденсаторы. Необходимый для питания индукционной печи переменный ток повышенной частоты вырабатывается в машинных или ламповых генераторах (преобразователях). Обычно для индукционных печей (в отличие от закалочных агрегатов ТВЧ) применяются токи

невысокой частоты: 500-2500 Гц.

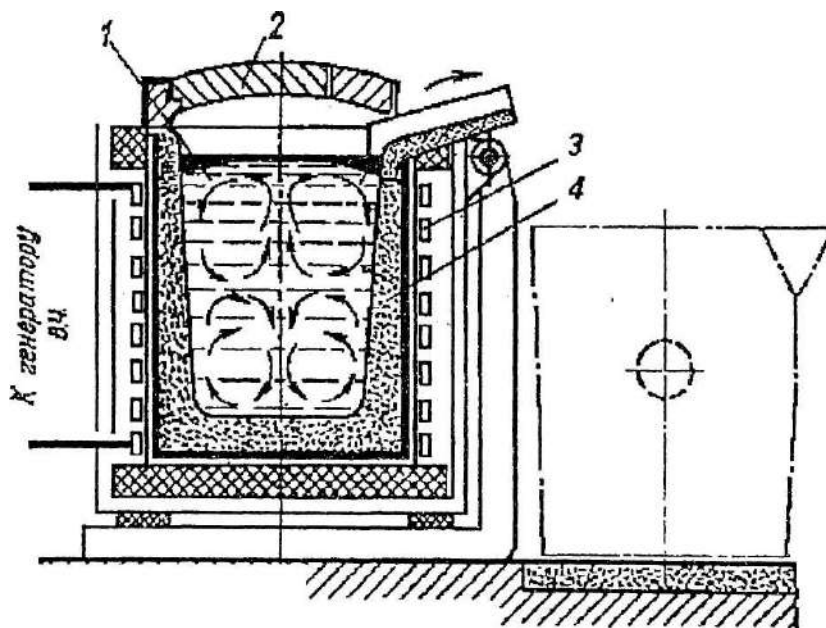


Рис. 1.8. Схема индукционной тигельной электрической плавильной печи

При прохождении переменного тока через индуктор печи образуется переменное магнитное поле. Магнитный поток наводит во вторичном контуре (тигель с загруженным в него металлом) вихревые переменные токи (*токи Фуко*) I . Под действием этих токов металл в тигле нагревается и расплавляется. Вихревые токи создают интенсивную циркуляцию жидкого металла, что способствует ускорению химических реакций, выравниванию температуры и состава во всем объеме расплава, всплыванию неметаллических включений. Выплавку стали в этих печах обычно осуществляют методом переплава. Угар легирующих элементов при этом незначителен. При этом тщательно проводят расчет химического состава шихты (количество ферросплавов, химический состав скрапа, угар).

Скрап и ферросплавы загружают одновременно, т. к. плавка протекает быстро и анализы химического состава по ходу плавки не делают. После расплавления металла на его поверхность засыпают флюс. Если

футеровка основная, то флюс состоит из извести и плавикового шпата для повышения жидкотекучести шлака. В кислых тиглях применяется бой стекла или SiO_2 . Для плавки берут только чистую по примесям шихту. Раскисление ферромарганцем, ферросилицием, алюминием производят перед выпуском стали. Индукционные печи имеют емкость от 10 кг до 10 т.

Технико-экономические показатели плавки в индукционных печах

Индукционные печи имеют ряд преимуществ перед дуговыми. В них отсутствует электрическая дуга, и, следовательно, нет науглероживания стали за счет электродов, нет перегрева жидкого металла (температура электрической

дуги - до 6000 °С). Наличие магнитных потоков способствует хорошему перемешиванию металла по химическому составу. Внутри печи легко создать вакуум или регулируемую атмосферу из газов определенного состава. Недостатком индукционной плавки является высокая стоимость оборудования и низкая металлургическая активность шлака. Шлак нагревается только за счет тепла металлической ванны.

Применение:

Индукционные печи применяются для выплавки высококачественных специальных легированных сталей и сплавов, особенно сталей с низким содержанием углерода (кислотостойкие нержавеющие стали).

1.4.5. Разливка стали на слитки

Выплавленную сталь выпускают из плавильной печи в разливочный ковш. Разливочный ковш состоит из стального кожуха, выложенного огнеупорным материалом, и дозирующего устройства. Ковш имеет емкость от 5 до 500 т стали. Из ковша сталь разливается в *изложницы* (чугунные формы) разного поперечного сечения. Из слитков квадратного сечения получают сортовой прокат (двутавровые балки, швеллеры, уголки, рельсы и т. д.). Слитки прямоугольного сечения прокатывают в листы, слитки круглого сечения идут для производства труб, многогранные - для поковок.

Для разливки кипящей стали применяются изложницы, расширяющиеся книзу (рис. 1.9, а), для разливки спокойной стали - изложницы, расширяющиеся вверх (рис. 1.9, б).

Изложницы для разливки спокойной стали имеют прибыльные надставки 8, футерованные внутри огнеупорной массой 9. Сталь в прибыльной надставке дольше находится в жидком состоянии и питает затвердевающий слиток металлом, благодаря чему уменьшается глубина усадочной раковины, уменьшаются отходы при обрезке его головной части. Размеры изложниц зависят от назначения слитка. Для прокатки применяют слитки весом 200-250 т. Слитки легированных сталей меньше - от 500 кг до 7 т.

Применяют три основных способа разливки стали: в изложницу сверху; в изложницы сифоном; на установках непрерывной разливки.

В изложницу сверху (рис. 1.9, а) сталь заливается непосредственно из ковша 1. При разливке сверху исключается расход металла на литники, оборудование простое. Однако при разливке сверху сталь падает в изложницу с большой высоты, брызги металла застывают на стенках изложницы и ухудшают поверхность слитка.

При *сифонной разливке* (рис. 1.9, б) сталью заполняют одновременно несколько изложниц. Изложницы устанавливают на поддоне 6, в центре которого находится центральный литник 3, футерованный трубками 4. Жидкая сталь 2 из ковша 1 поступает по каналу 7 в нижнюю часть изложницы 5. Этот

способ разливки обеспечивает плавное, без брызг заполнение изложниц, поверхность слитка получается чистой, сокращается продолжительность разливки стали.

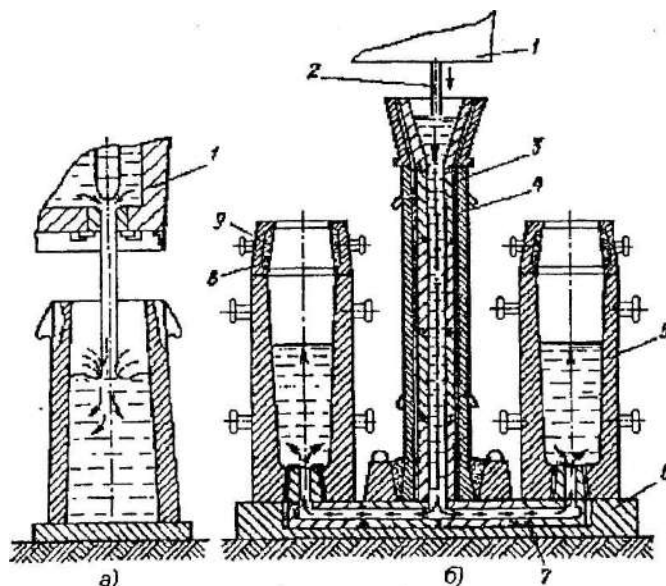


Рис. 1.9. Разливка стали в изложницы: а - сверху; б – сифоном

Однако при сифонной разливке повышается трудоемкость подготовки оборудования, увеличивается расход металла на литники.

Для легированных и высококачественных сталей применяется разливка сифоном. *Непрерывная разливка* стали (рис. 1.10) состоит в том, что жидкую сталь из ковша 1 через промежуточное устройство 2 непрерывно подают в водо охлаждаемый кристаллизатор 3. Из кристаллизатора вытягивают слиток 4 валками 5 со скоростью порядка 1 м/мин.

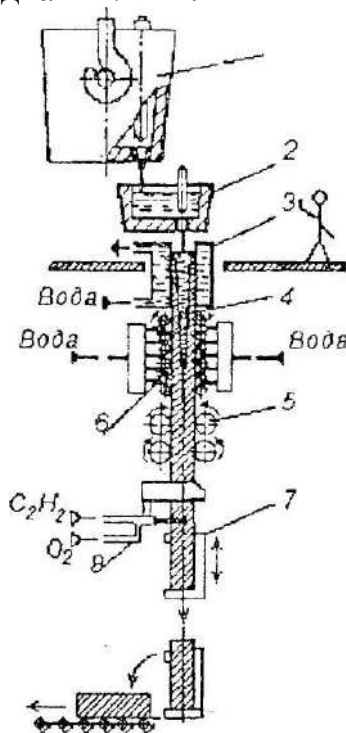


Рис. 1. 10. Схема установки для непрерывной разливки стали

На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается струей воды 6 и попадает в зону 7 газовой ацетилено-кислородной резки на мерные заготовки.

При непрерывной разливке слитки не имеют усадочной раковины и поступают на станы сортовой прокатки, минуя блюминги и слябинги.

Технико-экономические показатели разливки стали

Технико-экономические показатели разливки стали характеризуются *выходом родного металла*, т. е. отношением массы слитков, передаваемых на прокатку, к массе разлитой стали, *стойкостью изложниц* и *производительностью*, т/ч.

Выход годного металла при разливке спокойной стали составляет около 70 %, кипящей стали - до 80 %. Наибольший выход годного - до 98 % - достигается при непрерывной разливке/Стойкость изложниц составляет 100-300 заливок.

1.4.6. Способы повышения качества стали

Технология выплавки стали в любых плавильных агрегатах не позволяет получить высококачественную сталь с низким содержанием газов, вредных примесей и неметаллических включений. Поэтому процесс очистки проводят после выпуска металла из печи - в ковше или при повторном переплаве стали.

Наиболее простым способом, является *продувка стали* в ковше *инертными газами*, чаще всего аргоном. Проходящие через металл пузырьки аргона адсорбируют неметаллические включения и растворяют в себе водород, азот и кислород, находящиеся в стали. *Обработка стали синтетическим шлаком* позволяет удалять не только газы и неметаллические включения, но и серу. Специальный синтетический шлак, содержащий до 55 % CaO, 40 % Al₂O₃, немного SiO₂ и MgO, предварительно расплавляют и заливают в пустой ковш. Затем туда с определенной высоты выпускают сталь. Интенсивное перемешивание стали и шлака резко повышает эффективность металлургических реакций - в сотни раз.

Такой же эффект достигается *продувкой стали порошкообразной шлакообразующей смесью*, состоящей из извести и плавикового шпата. Эффект очистки стали *вакуумированием* основан на уменьшении растворимости газов при снижении давления над зеркалом жидкой стали. Бурно выделяющиеся при этом пузырьки газов увлекают за собой и неметаллические включения. Вакуумирование осуществляют в печи или в ковше, установленных в вакуумных камерах, а также при переливе стали из ковша в ковш.

Эффект повышения качества стали с помощью *повторного переплава* основан на тех же явлениях, что и внепечная обработка жидкой стали, т. е. на

очистке жидким шлаком или на явлении вакуумирования. Переплавка ведется на установках, создающих соответствующие условия обработки расплавляемых порций стали. К таким способам относятся: электрошлаковый переплав, переплав в вакуумно-дуговой печи, переплав в электронно-лучевой печи и др.

Технико-экономические показатели процесса внепечной обработки стали

Эффективность переплава оценивается производительностью процесса и расходом электроэнергии на тонну переплавленной стали. Производительность установок для переплава достигает 300-860 кг/час, а расход электроэнергии составляет от 300 до 450 кВт-ч/т.

Область применения:

Получение высококачественных сталей и сплавов, а также тугоплавких металлов для деталей ответственного назначения, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

1.5. Производство цветных металлов

Разделение металлов на черные и цветные весьма условно. К цветным относятся медь, алюминий, титан и другие металлы. Они занимают после железа главное место в машиностроении.

1.5.1. Производство меди

Медь по электропроводности уступает лишь серебру и является главным проводником в электро- и радиотехнике, где потребляется 40-50 % выплавляемой меди. Вторая половина меди используется в машиностроении в виде сплавов - латуни и бронзы.

Медные руды. Медь встречается в природе главным образом в виде сернистых соединений CuS , Cu_2S и очень редко в виде самородков. Самые распространенные медные руды - это медный колчедан и медный блеск. Все медные руды являются бедными и обычно содержат 1-2 % Си. Пустая порода состоит из песчаников (SiO_2), сульфидов железа FeS (пирит) и т. п.

Медные руды являются комплексными полиметаллическими и содержат, кроме Си, еще никель, цинк, свинец, золото, серебро и другие металлы.

Пирометаллургический способ производства меди

Этот способ является главным, т. к. он позволяет извлекать из руд попутно с медью другие драгоценные металлы. Этим способом производят 90 % всей меди.

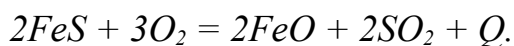
Обогащение медных руд производится методом флотации. Сущность флотации заключается в том, что во флотационной машине через пульпу продувают воздух. Пульпа состоит из воды, тонкоизмельченной руды (размер частиц 0,05-0,5 мм) и специальных реагентов, которые образуют на поверхности металлосодержащих частиц пленку, не смачиваемую водой. К таким частицам легко прилипают пузырьки воздуха. В результате они всплывают на поверхность в виде пены, а пустая порода осаждается на дно.

Пену сушат и получают рудный концентрат, содержащий 10-35 % меди. **Обжиг** производится в вертикальных многоподовых печах (диаметр около 7 м, высота около 10 м), в которых измельченный рудный концентрат постепенно перемещается механическими гребками с верхнего на нижний, второй под, затем на - третий и т. д. Необходимая температура 850°C обеспечивается в результате горения серы. Образующийся сернистый газ SO₂ очищается и направляется на производство серной кислоты. Содержание серы в концентрате снижается вдвое.

Плавка на штейн проводится в пламенных печах, работающих на, пылевидном (уголь), жидком или газообразном топливе. При плавке обожженного концентрата при температуре 1500-1600 °C образуется первичный штейн, состоящий из сульфида меди CuS (20-60 % Cu), сульфида железа FeS (10-60 % Fe) и серы (20-25 %).

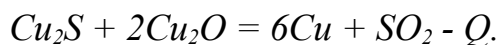
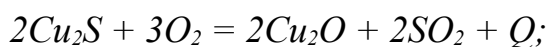
Продувка в конверторе. Расплавленный штейн из пламенной печи заливают в конвертор и продувают воздухом. В результате получают черновую медь.

Процесс выплавки черновой меди из штейна делится на два периода. В первом периоде удаляется сернистое железо (FeS):



Образуется белый штейн (в отличие от первичного темного штейна).

Во втором периоде из белого штейна образуется черновая медь окислением сульфида меди:



Таким образом, в конверторе получают черновую медь МК1, содержащую 99 % Си, остальное - Fe, Ni, Pb и небольшое количество других примесей (Zn, Sb, Au, Ag).

Рафинирование меди производят сначала огневым, затем электролитическим способом.

Огневое рафинирование ведут в пламенных печах емкостью до 400 т. Сущность огневого рафинирования заключается в окислении продувкой воздухом примесей, имеющих большее сродство к кислороду, чем медь, и в удалении

их с газами или в шлак (SbO_2 , PbO , ZnO удаляются с газами, а FeO , Al_2O_3 , SiO_2 - в шлак).

Этот период называется окислительным. Au и Ag не окисляются и растворяются в меди. Во второй период (восстановительный) восстанавливается Cu из Cu_2O .

Для этого шлак удаляют. На поверхность ванны засыпают древесный уголь. (Это предохраняет металл от окисления.) Затем производят «дразнение» меди. В расплавленный металл погружают сначала сырые, а затем сухие деревянные шесты. В результате образуются пары воды и газообразные углеводороды (CH_4 и др.), они энергично раскисляют медь:



Готовую медь, содержащую 99,7 % Cu , разливают в слитки для проката или в анодные пластины для электролитического рафинирования.

Электролитическое рафинирование обеспечивает получение более чистой меди и отделение Au и Ag . Электролит - раствор сернокислой меди CuSO_4 и серной кислоты. Анод является пластиной из рафинированной меди. Катод - тонкий лист (0,5-0,7 мм) из электролитической меди. При пропускании постоянного тока (2-3 В, плотность тока 100-150 $\text{A}/\text{м}^2$) анод растворяется в электролите, и медь осаждается на катоде. Примеси золота и серебра выпадают в осадок.

1.5.2. Производство алюминия

Алюминий - наиболее распространенный металл в земной коре. Имеет высокую электропроводность (уступает только серебру и меди). Применяется в электротехнике как проводник. В машиностроении алюминий применяется в виде сплавов, например: дуралюмин ($\text{Al} + \text{Cu}$) - в самолетостроении, силумин ($\text{Al} + \text{Si}$) - в дизелестроении.

Основное сырье для получения алюминия - *алюминиевые руды*: бокситы, нефелины, алуниты и каолины. Наибольшее значение имеют бокситы.

Современное производство алюминия состоит из двух основных процессов: получение глинозема Al_2O_3 из алюминиевых руд и получение алюминия путем электролиза расплавленного глинозема. Электролитом при этом служит расплавленный криолит Na_3AlF_6 .

Получение глинозема щелочным способом заключается в обработке мелкоразмолотой руды (боксита) щелочью (раствором едкого натрия NaOH) в автоклавах при температуре 250 °С. При этом пустая порода выпадает в осадок, а раствор алюмината NaAlO_2 подвергается операции выкручивания с целью получения гидроокиси алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$. Кристаллическую гидроокись обжигают в трубчатых печах при температуре 1200 °С для обезвоживания. Гидроокись, теряя воду, превращается в чистый глинозем Al_2O_3 :

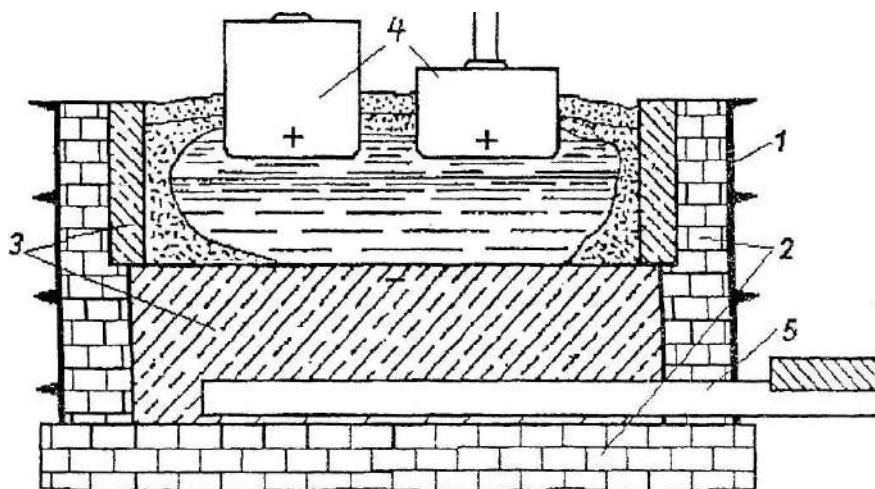
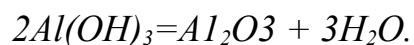


Рис. 1.11. Ванна для электролиза алюминия

Параллельно с получением глинозема идет производство *криолита* Na_3AlF_6 , необходимого для осуществления второй стадии получения алюминия - *электролиза*.

Глинозем и криолит подаются в электролизную ванну (рис. 1.31). Электролизная ванна представляет собой металлический кожух I, выложенный изнутри теплоизоляционной футеровкой 2. Подина и стены ванны составлены из углеродистых блоков 3. Нижние блоки имеют каналы, в которых проходят катодные шины 5. Аноды представляют собой углеродистые блоки 4, подвешенные на анодных стержнях. Свободными концами аноды опущены в электролит (расплав криолита). Электролизу подвергается раствор глинозема в расплавленном криолите при напряжении 4-4,5 В и плотности тока 0,7-1,2 А/см². В расплавленном криолите происходит диссоциация молекул глинозема:

Катионы алюминия Al^{3+} , разряжаясь на катоде, превращаются в металлический алюминий, который скапливается на дне электролизной ванны и периодически отбирается вакуумным ковшом. Полученный электролизом первичный алюминий подвергают рафинированию для удаления газов и примесей (железа, кремния и др.). С этой целью алюминий в печи или в ковше продувают газообразным хлором и отстаивают 30-45 минут. Для получения алюминия более высокой чистоты его подвергают электролитическому рафинированию.

Технико-экономические показатели производства алюминия

Технико-экономические показатели производства алюминия характеризуются *производительностью, затратами электроэнергии и вспомогательных материалов*.

На получение 1 т алюминия затрачивается 2 т глинозема, 0,1 т криолита, до 0,6 т угольных анодов и 16500-18500 кВт-ч электроэнергии.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

2.1. Металлические материалы

К ним относятся все металлы и их сплавы, среди которых можно выделить несколько групп, отличающихся друг от друга некоторыми факторами (цвет, свойства, стоимость):

а) Черные металлы.

Это железо и сплавы на его основе - стали и чугуны. (Содержание железа в таком сплаве должно быть не менее 50%).

б) Цветные металлы.

В эту группу входят, чаще всего, металлы и их сплавы, имеющие некоторую естественную окраску. Среди них: медь, алюминий, титан, магний, цинк и другие.

в) Благородные металлы.

К ним относятся золото, серебро, платина, металлы платиновой группы, такие, как палладий, иридий, осмий и др.

г) Редкоземельные металлы.

Это лантан, неодим, празеодим и др.

2.1.1. Сплавы черных металлов

Чугуны

В зависимости от того, в какой форме содержится в чугуне углерод, различают белые, серые, ковкие и высокопрочные чугуны.

Белые чугуны

Если весь углерод, входящий в состав чугуна, находится в связанном виде - в виде химического соединения Fe_3C , такой чугун называется *белым*.

Его излом светлый, с металлическим блеском, отчего и происходит название. По структуре белые чугуны подразделяются на *доэвтектические*, *эвтектические* и *заэвтектические*. Белые чугуны не способны пластически деформироваться, не обрабатываются резанием.

Для изготовления деталей машин белые чугуны не используются из-за их высокой хрупкости, а следовательно, и ненадежности. Применяют *отбеленные* чугунные детали, у которых сердцевина имеет структуру серого чугуна, а на поверхности имеется слой со структурой белого чугуна. Так можно изготавливать валки прокатных станов, тормозные колодки, шары мельниц для размолва горных пород, лемех плугов, зубья ковшей экскаваторов, доски в драгах - то есть изделия, от которых требуется высокая твердость и износостойкость по-

верхности.

Основным же назначением белого чугуна является передел в ковкий путем отжига.

Серые чугуны

Если углерод, входящий в состав чугуна, находится в свободном виде - в виде графита, такой чугун называется *серым*.

Его излом темно-серый, без блеска, отчего и происходит название. Графит в сером чугуне имеет пластинчатое строение, а металлическая основа может быть ферритной, феррито-перлитной или перлитной.

Чем больше в чугуне углерода, тем больше в нем графита и тем ниже его механические свойства, но понижение содержания углерода приводит к ухудшению литейных свойств. Поэтому для толстостенных отливок применяют чугун с более низким содержанием углерода, а для тонкостенных - с более высоким.

Механические свойства серого чугуна зависят от свойств металлической основы, но главным образом - от количества, формы и размеров графитных включений. Прочность, твердость и износостойкость чугунов растут с увеличением количества перлита в структуре. Прочность при сжатии и твердость серого чугуна близки к свойствам стали с той же структурой, т. е. при более "мягких" видах нагружения вредное влияние графита сказывается меньше.

Серый чугун обладает демпфирующей способностью (гасит механические колебания), нечувствителен к надразам, хорошо обрабатывается резанием. Этому тоже способствуют включения графита.

Детали из серого чугуна изготавливают литьем с последующей обработкой резанием.

Маркировка. В соответствии с ГОСТ 1412-85 марка серого чугуна состоит из букв СЧ и числа, показывающего значение предела прочности при растяжении в кгс/мм², например СЧ 25.

Применение. *Ферритные* серые чугуны СЧ 10, СЧ 15, СЧ 18 используют для слабо- и средненагруженных деталей: крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов, подшипников, насосов, суппорты, диски сцепления и др.

Феррито-перлитные серые чугуны СЧ 20, СЧ 21, СЧ 25 предназначены для деталей, работающих при повышенных нагрузках: блоки цилиндров, картеры двигателя, поршни цилиндров, зубчатые колеса, станины различных станков.

Перлитные серые модифицированные чугуны СЧ 30, СЧ 35, СЧ 40, СЧ 45 имеют наиболее высокие механические свойства из-за мелких разобщенных графитных включений. Получают эти чугуны путем модифицирования жидкого чугуна ферросилицием или силикокальцием. Используют при высоких нагрузках: зубчатые колеса, гильзы блоков цилиндров, шпиндели, распределительные валы и др.

Высокопрочные чугуны

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму.

Высокопрочные чугуны получают путем модифицирования: в жидкий чугун добавляют магний (Mg) в количестве 0,02 - 0,08 %.

Механические свойства. По химическому составу высокопрочные чугуны не отличаются от серых, но шаровидный графит является менее сильным концентратором напряжений, чем пластинчатый, поэтому прочность и пластичность этих чугунов выше, чем серых. Этот факт отражен в названии данной разновидности чугунов. Значения механических характеристик некоторых марок высокопрочных чугунов приводятся в табл. 8.1.

Маркировка. В соответствии с ГОСТ 7293-85 марка высокопрочного чугуна состоит из букв ВЧ и числа, показывающего значение предела прочности при растяжении в кгс/мм², например ВЧ 60.

Применение. Высокопрочные чугуны способны эффективно заменять сталь во многих изделиях и конструкциях. Они могут работать при высоких циклических нагрузках и в условиях износа. Из них изготавливают валки прокатных станов массой до 12 т, кузнечно-прессовое оборудование (траверсы прессов, шаботы молотов), корпуса и лопасти турбин, коленчатые валы и поршни в дизелях, тракторах, автомобилях и многие другие детали. Для улучшения механических свойств отливок из высокопрочного чугуна применяют термообработку: закалку и отпуск.

Ковкие чугуны

Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму.

Ковкие чугуны получают отжигом белых доэвтектических чугунов. Графит в ковких чугунах называют *углеродом отжига*. Отливки, предназначенные для отжига на ковкий чугун, должны быть тонкостенными - иначе в сердцевине при кристаллизации может образоваться пластинчатый графит.

Механические свойства. В отличие от пластинчатого графита, хлопьевидные графитные включения меньше снижают механические свойства металлической основы, поэтому ковкий чугун прочнее и пластичнее серого, хотя и уступает высокопрочному. Название “ковкий” - условное, ковать или иначе деформировать ковкие чугуны, как и другие, нельзя.

Маркировка. В соответствии с ГОСТ 1215-87 марка ковкого чугуна состоит из букв КЧ и двух чисел, первое из которых показывает значение предела прочности при растяжении в кгс/мм², а второе - относительное удлинение в %, например КЧ 45-7.

Применение. Ковкие чугуны широко применяются в сельскохозяйственном, автомобильном, текстильном машиностроении. Из них изготавливают де-

тали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки. Хорошие литейные свойства исходного белого чугуна позволяют получать отливки сложной формы, как правило, малой толщины. Примеры деталей из ковкого чугуна: картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы, муфты, втулки, тормозные колодки, звенья и ролики цепей конвейера.

Недостатком ковких чугунов является их высокая стоимость из-за продолжительного дорогостоящего отжига.

Стали

Стали подразделяют на углеродистые и легированные

В углеродистых сталях, представляющих собой сплавы железа с определенным количеством углерода, все остальные элементы находятся в небольшом количестве в качестве примесей.

Содержащиеся в металле примеси и углерод очень сильно влияют на свойства стали.

Углерод - способствует снижению пластичности стали, развитию хладноломкости, уменьшает ударную вязкость, ухудшает свариваемость, увеличивает твердость стали.

Вследствие понижения пластических свойств для сталей с повышенным и высоким содержанием углерода затруднена холодная пластическая деформация из-за опасности появления трещин. Поэтому при изготовлении сложных по форме деталей холодной штамповкой чаще всего применяют низкоуглеродистую сталь ($< 0,1\% \text{ C}$). При получении сварных конструкций также стараются использовать низкоуглеродистые стали.

Классификация углеродистых сталей

Классификация сталей может проводиться по разным признакам, основными из которых являются качество, назначение и структура. Ниже приводятся разновидности сталей по первым двум признакам.

По качеству различают:

- а) стали обыкновенного качества;
- б) качественные стали;
- в) высококачественные стали.

Эти группы отличаются количеством вредных примесей и неметаллических включений, которые влияют на механические свойства.

В сталях *обыкновенного качества* допускается до $0,06\% \text{ S}$ и до $0,07\% \text{ P}$. В них имеется повышенное количество неметаллических включений.

Качественные стали - это более чистые по примесям материалы. В них допускается не более $0,04\% \text{ S}$ и $0,035\% \text{ P}$ и, соответственно, меньше неметаллических включений.

В *высококачественных сталях* содержится до 0,025% S и до 0,025% P. Это наиболее чистые по вредным примесям стали.

По назначению можно выделить 3 группы углеродистых сталей:

- а) стали общего назначения;
- б) конструкционные стали;
- в) инструментальные стали.

Конструкционные стали чаще всего применяются для изготовления деталей машин (небольшие валки, втулки, мелкие шестерни, кулачки и т. п.).

По качеству это качественные стали.

Обозначаются конструкционные стали цифрой, показывающей содержание углерода в сотых долях процента. В некоторых марках в конце могут быть буквы, указывающие на степень раскисления при выплавке.

Среди материалов этой группы есть низкоуглеродистые стали, например: 08кп, 10, 15 (содержащие соответственно 0,8; 0,1; 0,15% C) и среднеуглеродистые, примерами которых могут быть марки: 40, 45, 50, 60 (в которых соответственно 0,4; 0,45; 0,5; 0,6% C).

Низкоуглеродистые стали широко применяются, вследствие их хорошей пластичности, для изготовления изделий холодной пластической деформацией (например, штамповкой). В этом случае необходимо, чтобы металл выдерживал большие деформации без разрушения. Примерами подобных изделий могут быть детали кузова легковых автомобилей, корпуса или кожухи сложного профиля для различных изделий и т. п.

Среднеуглеродистые конструкционные стали используются для изготовления упрочняемых термической обработкой деталей. Чаще всего они подвергаются закалке и отпуску на твердость HRC =40-50.

Среди конструкционных углеродистых сталей есть так называемые автоматные стали. Это стали, которые за счет повышенного содержания серы и фосфора имеют хорошую обрабатываемость резанием. Используются они при массовом производстве деталей на станках-автоматах, автоматических линиях, т. е. там, где требуется высокопроизводительная обработка при достаточно хорошей стойкости режущего инструмента.

При обозначении автоматных сталей в начале марки ставится буква "А".

Например А12, А20. Цифры показывают содержание углерода (0,12 и 0,20%).

Эти материалы имеют пониженную вязкость и пластичность, более низкую коррозионную стойкость, что связано с особенностями их состава. Широкое применение они находят при изготовлении крепежных деталей типа гаек, болтов, шпилек и т. п.

Легированные стали

Потребность современной техники в материалах, способных работать в различных условиях: при повышенных и высоких температурах, в агрессивных

средах, в условиях интенсивного износа, при низких отрицательных температурах и т. д., привела к созданию специального класса сталей, обладающих необходимыми свойствами.

При формировании таких материалов в сталь начали вводить определенные элементы. Эти элементы называют легирующими, а сталь, содержащую легирующие элементы, - легированной.

В легированных сталях удалось повысить прокаливаемость, по сравнению с углеродистыми сталями, обеспечить более высокие антикоррозионные свойства и износостойкость и существенно увеличить другие характеристики.

В качестве легирующих элементов очень часто используются хром, кремний, марганец, вольфрам, молибден, кобальт, титан, ванадий, никель и другие.

Классификация и обозначение легированных сталей

Классификация этого класса сталей может строиться по нескольким признакам. Основными из них являются назначение и структура после охлаждения небольших образцов из аустенитного состояния на воздухе. Ниже и будет рассмотрена классификация по этим признакам.

По назначению различают 3 группы легированных сталей:

- 1) конструкционные стали;
- 2) инструментальные стали;
- 3) стали с особыми свойствами.

Конструкционные стали - широко используются для изготовления различных видов деталей машин и механизмов. Например, оси, валы, шестерни, рессоры, пружины и т. д.

В соответствии с условиями работы этих деталей и особенностями нагружения они должны иметь достаточно высокую прочность, запас пластичности, вязкости, необходимый для работы без разрушения, высокую прочность при длительных циклических или знакопеременных нагрузках (предел выносливости).

Если детали работают при низких отрицательных температурах, то необходим низкий порог хладноломкости. Наличие каких-либо других требований к свойствам стали, дополнительно к вышеназванным, может возникать для конкретных условий эксплуатации деталей.

Конструкционные легированные стали обычно бывают низкоуглеродистые и среднеуглеродистые ($C=0,1-0,6\%$). Детали, изготовленные из среднеуглеродистых сталей, обычно подвергаются упрочняющей термической обработке - закалке и отпуску для формирования необходимого комплекса свойств.

Низкоуглеродистые стали этой группы ($\sim 0,10-0,15\%C$) широко используются для изготовления изделий холодной пластической деформацией

(вследствие их повышенной пластичности) и для получения сварных конструкций.

Обозначаются конструкционные стали следующим образом.

В начале марки ставится цифра, показывающая содержание углерода в сотых долях процента. Затем указываются буквы, соответствующие введенным легирующим элементам, и цифры, показывающие их количество в процентах. Если элемент присутствует в стали в количестве около 1% или меньше этого, то цифра после буквы не ставится.

Легирующие элементы в марках сталей обозначаются следующими буквами:

Cr - X, Ni - H, Mn - Г, Co - К, Si - С, W - В, V - Ф, Mo - М, Al - Ю, Ti - Т, B - Р, Cu - Д, P - П, редкоземельные металлы - Ч.

Примеры марок конструкционных сталей: 12ГС (0,12% С; 1% Mn; 1% Si), 50С2 (0,5% С; 2% Si), 40ХН (0,4% С; 1% Cr; 1% Ni), 30Х2ГСН2ВМ (0,3% С; 2% Cr; 1% Mn; 1% Si; 2% Ni; 1% W; < 1% Mo).

Большинство сталей этой группы выпускаются металлургическими заводами как качественные, но некоторые марки могут быть и высококачественные. В последнем случае в конце марки ставится буква "А". Например, 38ХНЗМА, 30Х5МСФА.

Следует отметить, что стали, легированные никелем, имеют низкий порог хладноломкости и более высокое сопротивление хрупкому разрушению, чем стали без никеля. Но использование для легирования никеля, а также вольфрама, молибдена, кобальта сильно удорожает сталь.

Так, порог хладноломкости (температура, при которой ударная вязкость стали сохраняется на уровне 50%) углеродистой стали 40 составляет -20°C, у стали 40ХН - 60°C, а у 30ХНЗ - 100°C.

Это особенно важно знать при выборе материала для деталей, работающих при низких температурах (например, в зимних условиях Сибири и Крайнего Севера).

Среди наиболее простых и дешевых конструкционных легированных сталей можно назвать марку 40Х. После закалки с 860°C и отпуска при 500°C она имеет следующие свойства:

$\sigma_b=1000$ МПа; $\sigma_{0,2}=800$ МПа; $\delta=10\%$; KCU=500 КДж/м².

Более сложная и дорогая сталь 40ХНМА после закалки с 850°C имеет: $\sigma_b=1100$ МПа; $\sigma_{0,2}=950$ МПа; $\delta=12\%$; KCU=800 КДж/м².

Среди рассматриваемых материалов есть так называемые пружинные стали, предназначенные для изготовления пружин, рессор и т. п. изделий. В них несколько повышенное содержание углерода - 0,5-0,70%. Это необходимо для обеспечения высокого предела текучести. Примерами марок пружинных сталей являются 65Г, 55С2, 50ХФА. Изделия из них подвергаются упрочняющей термической обработке (закалке и отпуску) на твердость 35-48 HRC.

В рассматриваемой группе есть и высокопрочные конструкционные стали, которые после термической обработки могут иметь предел прочности

при растяжении на уровне 1500-2000 МПа и больше. Необходимость в таких высокопрочных материалах связана с тем, что для ряда конструкций требуется обеспечить высокую прочность при малом весе конструкции, малых габаритах и т. п.

Среди высокопрочных марок конструкционных сталей можно назвать 30ХГСНА, 40ХГСНЗВА, 30Х5МСФА. Как правило, это среднеуглеродистые, сложнолегированные стали.

В качестве примера приведем механические свойства сталей:

30Х5МСФА после закалки с 1000°C и отпуска при 500°C: $\sigma_b=1800$ МПа; $\sigma_{0,2}=1600$ МПа; $\delta=8\%$; KCU=500 КДж/м²;

36Х2Н2МФА после закалки с 850°C и отпуска при 250°C: $\sigma_b=1710$ МПа; $\sigma_{0,2}=1460$ МПа; $\delta=10\%$; KCU=560 КДж/м².

Следует учитывать, что в высокопрочном состоянии стали обычно имеют низкую пластичность, поэтому в ряде случаев при действии больших динамических нагрузок может возникать опасность хрупкого разрушения.

Стали с особыми свойствами - это группа материалов, в которых путем легирования повышен уровень определенных свойств применительно к конкретным условиям работы изделий. Т. е. стали с особыми свойствами предназначены для изготовления изделий, работающих в каких-то специфических условиях. Такими условиями могут быть высокие температуры, коррозионные среды, интенсивный износ, необходимость высоких магнитных свойств и т. д.

В соответствии с этим среди сталей с особыми свойствами можно выделить несколько подгрупп: жаропрочные, жаростойкие, нержавеющие, износостойкие стали и др.

г) *Износостойкие стали* - это материалы, предназначенные для работы в условиях изнашивающих нагрузок, часто при интенсивном износе.

При формировании структуры износостойких сталей учитывают, что чем выше их твердость и чем больше в них содержится твердых избыточных карбидов, тем выше сопротивление износу. Поэтому данные стали, как правило, высокоуглеродистые и легированы карбидообразующими элементами (Cr, V, W, Ti и др.).

В качестве износостойких используются следующие марки сталей: ХВГ (0,95% С), ХВ4Ф (1,35% С), Х6ВФ (1,1% С), 9ХС, Х12 (2,1% С), Х12МФ (1,55% С) и др.

Наиболее высокой износостойкостью из этого ряда обладают стали Х12, Х12МФ и ХВ4Ф за счет большого содержания углерода и наличия в структуре после закалки и отпуска твердого мартенсита и большого количества специальных карбидов.

Для формирования необходимых свойств детали из износостойких сталей обязательно подвергаются упрочняющей термической обработке (закалке и отпуску).

Особое место среди износостойких материалов занимают

высокомарганцовистые высокоуглеродистые стали. Представителем их является сталь Гадфильда - 120Г13. За счет большого содержания марганца (13%) точки Мн и Мк на С-образной диаграмме этой стали смещены вниз, в область более низких температур. Поэтому при закалке в стали получается аустенитная структура.

Режим закалки стали 120Г13 - нагрев до 1100°C и охлаждение в воде.

После этого, в связи с аустенитной структурой, сталь имеет невысокие твердость и прочность, но очень хорошие пластические свойства, ударную вязкость: $\sigma_B=900$ МПа; HB=200; $\sigma_{0,2}=350$ МПа; $\delta=45\%$; KCU=2500 КДж/м².

Особенностью сталей типа 120Г13 является их высокая износостойкость при сильном динамическом, ударном нагружении. При этом происходит наклеп аустенита и сильное его упрочнение.

2.1.2. Сплавы цветных металлов

Алюминий и его сплавы

Алюминий - металл серебристо-белый с матовым оттенком. Кристаллическая решетка алюминия - гранецентрированный куб с периодом $a=0,4041$ нм. Полиморфных превращений алюминий не имеет. Температура плавления 660°C, температура кипения 2060°C. Механические свойства чистого отожженного алюминия небольшие: $\sigma_B=50-60$ МПа, $\sigma_{0,2}=15-20$ МПа, твердость 20-25 НВ, высокая пластичность: удлинение при разрыве 30-50% и сужение 80-95%.

Чистый алюминий применяют в электротехнике для изготовления проводников.

Основная масса алюминия расходуется на производство алюминиевых сплавов, которые в зависимости от того, каким способом получают из них детали и изделия, делятся на *деформируемые и литейные*.

Деформируемые сплавы легко поддаются обработке давлением и предназначены для прокатки,ковки, прессования. Литейные сплавы отличаются жидкотекучестью, хорошо заполняют форму, малочувствительны к литейным трещинам; их используют для изготовления фасонных отливок при помощи литья в землю или в металлические формы.

Литейные алюминиевые сплавы должны обладать узким температурным интервалом кристаллизации для получения плотной отливки, т.е. это сплавы, близкие к эвтектике или равные эвтектике. Известные литейные сплавы Al-Cu, Al-Zn, Al-Si. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы алюминий - кремний, по составу близкие к эвтектическому. Эти сплавы называют силуминами.

Медь и ее сплавы

Главными отличительными характеристиками меди являются высокая теплопроводность и электропроводность, пластичность и коррозионная стойкость. Но также, как и у алюминия, примеси отрицательно влияют на свойства меди. В зависимости от содержания примесей различают следующие марки меди: М00 (99,99%Cu), М0 (99,97%Cu), М2 (99,7%Cu) и т.д. ГОСТ 859-78. Благодаря высокой электропроводности медь нашла широкое применение в электротехнике. Из меди изготавливают шины, ленты, кабели, рубильники, обмотки электродвигателей и т.д.

Медные сплавы, как и сплавы большинства других цветных металлов, по технологическим свойствам подразделяются на деформируемые (которые используются в производстве полуфабрикатов: листов, полос, профилей, проволоки и т.д.) и литейные (применяемые для изделий, которые получают путем литья в песчаные или металлические формы, а также методами непрерывной разливки и центробежного литья). По способности упрочняться с помощью термической обработки медные сплавы делятся на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. По химическому составу медные сплавы подразделяются на 2 основные группы: латуни и бронзы.

Сплавы меди с цинком носят название “латунь”. Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы, такие, как Al, Ni, Mn. Маркируются двойные латуни следующим образом: вначале ставится буква Л (латунь), а затем цифра, показывающая содержание меди в %.

Латунь используется как конструкционный материал там, где требуются высокая прочность и коррозионная стойкость: в трубопроводной арматуре, в химическом машиностроении и особенно в судостроении. Изготавливают из латуней листы, ленты, проволоку, а затем из этого проката - радиаторные трубки, снарядные гильзы, трубопроводы, шайбы, гайки, втулки, уплотнительные кольца, токопроводящие детали электрооборудования.

Бронзы - это сплавы меди со всеми другими элементами, кроме цинка, и называют их с прилагательным, указывающим на второй компонент. В наше время бронзы различают по химическому составу, и в зависимости от состава и состояния обработки прочность бронз может быть повышена с 200 до 750 МПа. Бронзы подразделяются на алюминиевые, оловянистые, кремнистые, бериллиевые и т.д. Бронзы маркируют буквами “Бр” (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, указывающие на название и содержание в % легирующих элементов.

2.2. Неметаллические материалы

Среди них имеется несколько характерных групп:

а) Пластмассы.

Это материалы на основе высокомолекулярных соединений - полимеров, чаще всего с некоторыми добавками.

б) Керамические материалы (керамика).

Основа этих материалов - порошки тугоплавких соединений: карбидов, окислов, нитридов, боридов и др. Например, Al_2O_3 , SiO_2 , TiC , SiC , BN , TiN , TiB_2 .

в) Керамико-металлические материалы.

В отличие от предыдущей группы, здесь основой является керамика, к которой добавляют некоторое количество металла, являющегося связкой и положительно влияющего на некоторые свойства (например, пластичность, вязкость).

г) Стекло.

Стекло представляет собой систему, состоящую из окислов различных элементов.

д) Резина.

Это материал на основе каучука - углеродно-водородного полимера с добавлением, чаще всего, серы и других элементов.

ж) Дерево.

Среди неметаллических материалов иногда выделяют еще некоторые группы, на которых мы в данном курсе не останавливаемся.

2.3. Композиционные материалы

Композиционными называют материалы, представляющие собой композицию (в большинстве случаев искусственно получаемую) из двух и более разнородных материалов с резко отличающимися свойствами. В результате свойства такой композиции будут другими по сравнению с ее составляющими, т. е. в данном материале формируется новый комплекс свойств.

В состав композиционного материала могут входить как металлические, так и неметаллические составляющие.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК

3.1. Получение заготовок методами литья

Сущность литейного производства состоит в получении *отливок* – литых металлических изделий – путем заливки расплавленного металла или сплава в литейную форму.

Первые литые изделия получали еще в III-II тысячелетиях до н. э., сначала из бронзы, позже – из чугуна. Значительное развитие литье из чугуна получило примерно с XIII-XIV вв. Стальные отливки начали получать в XIX в., а литые детали из алюминиевых и магниевых сплавов – всего несколько десятилетий назад.

Значение литейного производства исключительно велико. Нет ни одной отрасли машиностроения и приборостроения, где не применяли бы литые детали. В машиностроении масса литых деталей составляет около 50 % массы машин и механизмов, в станкостроении – около 80 %. Это объясняется рядом преимуществ литейного производства по сравнению с другими способами получения заготовок или готовых изделий. Литьем получают детали как простой, так и очень сложной формы, с фасонными внутренними полостями, которые нельзя или очень трудно получить другими способами. Во многих случаях это наиболее простой и дешевый способ получения изделий. Массы отливок колеблется от нескольких граммов до нескольких сот тонн.

Некоторые специальные способы литья позволяют получать отливки с высокой точностью размеров и чистой поверхности, что сокращает или исключает совсем их последующую механическую обработку. Кроме «традиционных» литейных сплавов – чугуна, стали, бронзы, – литьем все чаще изготавливают изделия из нержавеющей и жаропрочных сталей, магнитных и других сплавов с особыми физическими свойствами.

3.1.1. Плавильные агрегаты

В литейном производстве для каждого металла требуется своя плавильная печь и технология плавки. *Плавка чугуна* в литейных цехах производится в основном в вагранках (до 90% чугунных отливок), а также в индукционных печах. *Вагранка* – это шахтная печь высотой 3-10 м, внутренний диаметр 700-2500 мм, рис. 2.1. Шахта вагранки опирается на колонны 2, расположенные на фундаменте 1. В нижней части имеется откидная крышка 3. Печь выложена из шамотного кирпича 7, снаружи покрытого металлическим кожухом 8. Шихтовые материалы (литейный и переплавочный чугун, флюс – известняк, топливо – кокс) загружаются сверху с помощью бадьи 13 через загрузочное окно 10. Чугунные плиты 9 в верхней части шахты предотвращают разрушение футеровки металлическими компонентами шихты. Воздушное дутье для горения кокса по-

дают через фурмы 5 с помощью вентилятора 6. Расплавленный чугун стекает в горн, на под 4 и далее, через летку вагранки 14, - в копильник 15. Жидкий чугун через летку 17 сливается в ковш 18. Шлак по мере необходимости выпускают через шлаковую летку 16. Печные газы удаляются в трубу 12 с искрогасителем 11.

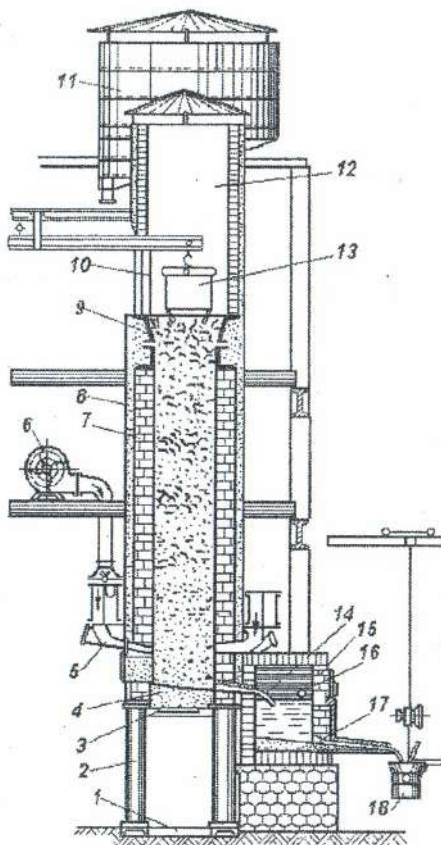


Рис. 3.1 Схема устройства вагранки

Иногда для выплавки чугуна применяются *дуплекс-процесс*: плавят чугун в вагранке, а доводку и рафинирование состава производят в индукционной печи. При этом получается чугун высокого качества, а расход электроэнергии снижается.

Плавка стали в литейных цехах производится, в основном, в электродуговых и индукционных печах – таких же, какие применяются для выплавки стали в металлургическом производстве. Эти печи отличаются высокой производительностью, в них можно выплавлять любые стали высокого качества. Индукционные печи выпускаются большого диапазона емкостей.

Плавка меди и ее сплавов производится в электрических печах с косвенной дугой и в индукционных печах с железным сердечником.

В *электрических печах с косвенной дугой* дуга горит между двумя электродами из графитизированной массы, а шихта нагревается за счет излучаемой дугой теплоты.

Индукционная печь с железным сердечником показана на рис 3.2.

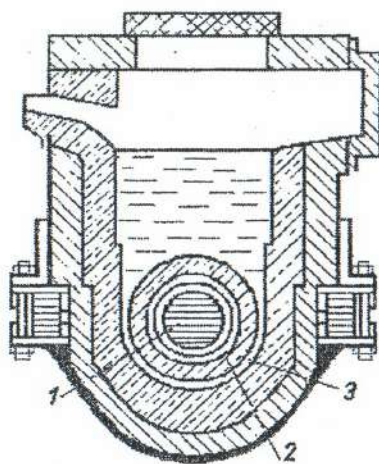


Рис. 3.2. Индукционная печь с железным сердечником

Сердечник 1 с первичной обмоткой защищен огнеупорной футеровкой 2. Жидкий металл, предварительно залитый в канал (кольцевой зазор) 3, создает короткозамкнутый вторичный виток, в нем индуктируется ток большой силы, нагревающий металл до высокой температуры. Происходит быстрый нагрев и плавление загружаемой сверху шихты.

В качестве шихты для выплавки бронз и латуней используют чистую медь, лом бронзы и латуни, отходы литейного производства. В качестве флюсов для защиты металла от окисления при плавке применяют: для бронз – соду, криолит, для латуней – песок SiO_2 , Na_2O и др.

Плавка алюминия и его сплавов производится в электрических печах сопротивления с нагревателями из нихрома. В качестве шихты используют чушковый первичный алюминий, металлолом, отходы литейного производства. Для легирования используют алюминиево-кремниевую лигатуру.

3.1.2. Литейные свойства сплавов

Основными литейными свойствами сплавов являются жидкотекучесть, усадка, склонность к ликвации и поглощению газов.

Жидкотекучесть – способность расплава свободно течь в литейной форме, заполняя все ее полости и точно воспроизводя все ее контуры. Жидкотекучесть зависит от химического состава сплава, его температуры при заливке, а также от материала формы и других факторов. Жидкотекучесть выше у сплавов, затвердевающих с образованием эвтектики.

Усадка – свойство металлов и сплавов уменьшать свой объем при затвердевании и охлаждении; при этом происходит и соответствующее уменьшение линейных размеров отливки.

Объемная усадка $\varepsilon_o = [(V_{\text{ф}} - V_{\text{отл}}) \cdot 100\%]: V_{\text{ф}}$;

Литейная усадка $\varepsilon_{\text{л}} = [(l_{\text{ф}} - l_{\text{отл}}) \cdot 100\%]: l_{\text{ф}}$,

Где $V_{\text{ф}}$ и $V_{\text{отл}}$, $l_{\text{ф}}$ и $l_{\text{отл}}$ – объем и размеры соответственно формы и отливки.

В результате объемной усадки в теле отливки могут образовываться усадочные раковины и пористости. Для предупреждения этих дефектов необходимо предусмотреть рациональную литниковую систему и прибыли. Усадку необходимо учитывать при расчете размеров модели и стержня. При наличии препятствий для усадки, а также в результате неодновременной и неравномерной усадки массивных и тонких сечений в отливках возникают напряжения, возможно коробление и образование трещин.

Величина усадки зависит от химического состава сплава, температуры его заливки и других факторов. Небольшую литейную усадку имеет серый чугун (0,8-1,2%), некоторые литейные алюминиевые сплавы (0,9-1,3%). У стали, линейная усадка достигает 1,8-2,2%. Объемная усадка примерно в три раза больше линейной.

Ликвация – химическая неоднородность затвердевшего сплава. На процесс развития ликвации оказывают влияние химический состав сплава, скорость охлаждения.

Склонность к поглощению газов. В расплавленном сплаве всегда находятся в растворенном состоянии газы – водород, азот и др. При затвердевании и последующем охлаждении растворимость газов уменьшается, и в результате их выделения в теле отливки могут образовываться газовые раковины и поры.

Растворимость газов зависит от химического состава сплава, его температуры и других факторов. Для уменьшения газонасыщенности сплавов применяют плавку в вакууме или в среде инертных газов, а также дегазацию вакуумированием в специальных камерах и другие меры.

3.1.3. Литье в песчаные формы

Все существующие способы литья разделяются на две группы: литье в песчаные формы и специальные способы литья.

Наибольшая доля отливок получается литьем в *песчаные (песчаноглинистые, земляные) формы* – более 60%.

Литье в песчаные формы называется еще литьем в разовые формы, т.к. литейная форма служит для отливки только одной детали, после чего разрушается.

На рис. 3.3 приведена литейная форма для получения втулки. Форма состоит из двух полуформ, полученных набивкой (уплотнением) формовочной смеси в металлические рамки – опоки 5 и 6. для изготовления верхней и нижней полуформ используют разъемную модель 2. Отверстие в отливке получают с помощью стержня 4, отдельно изготовленного из стержневой смеси. При сборке формы стержень устанавливают в углубления (гнезда), образованные в форме формовочными знаками 3 модели.

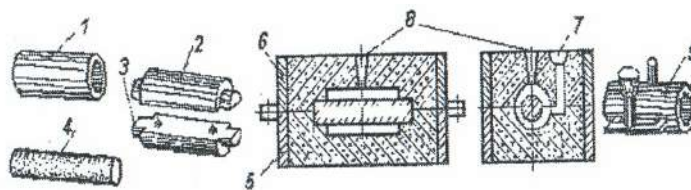


Рис. 3.3. Схема технологического процесса литья в песчано-глинистые формы

Металл заливают через литниковую систему 7. Воздух и выделяющиеся газы удаляются через выпор 8. Готовую отливку 9 извлекают из формы, отрезают литники, отчищают поверхность от остатков формовочных материалов и направляют на механическую обработку.

Литниковые системы служат для заливки металла в форму. Основными элементами литниковой системы являются литниковая чаша, стояк, шлакоуловитель, питатели, рис. 3.4.

Рис. 3.4. Элементы литниковой системы: 1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – питатели; 5, 6 – чаша и стояк выпоров; 7 – фильтр из стеклоткани.

Литниковые системы, в зависимости от формы, размеров отливки и свойств литейного сплава, имеют различное устройство, рис. 3.5.

Верхняя литниковая система – самая простая, применяется для мелких деталей небольшой высоты.

Сифонная (нижняя) литниковая система обеспечивает спокойное заполнение формы расплавом, применяется для средних и толстостенных отливок значительной высоты.

Ярусная литниковая система обеспечивает последовательное питание отливки снизу вверх, применяется для крупных отливок.

Вертикально-щелевая литниковая система – разновидность ярусной, предназначена главным образом для цветных сплавов.

Рис. 3.5. Типы литниковых систем: а – верхняя; б – сифонная; в – ярусная; г – вертикально-щелевая; 1 – чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – питатель; 5 – выпор; 6 – отливка.

Свойства формовочных смесей

Для получения отливок высокого качества формовочные и стержневые смеси, из которых делают разовые литейные формы, должны обладать определенными технологическими свойствами.

Прочность – способность смеси обеспечивать сохранность формы, без разрушения выдерживать давление заливаемого металла.

Пластичность – способность формовочной смеси воспринимать очерта-

ния модели.

Термическая устойчивость или *непригораемость* – способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого сплава без химического с ним взаимодействия или оплавления смеси.

Газопроницаемость – Способность пропускать газы через стенки формы вследствие пористости. Это одно из важнейших свойств формовочных смесей. В расплавленном металле всегда содержится растворимые газы, выделяющиеся при его охлаждении. Большое количество газов выделяется так же из самих формовочных материалов при их нагреве.

При недостаточной газопроницаемости в теле отливки могут образовываться газовые пузыри (поры).

Песчано-глинистые смеси состоят из наполнителя, связующего и различных добавок. Наполнителем является песок и бывшие в употреблении смеси. Связующее – глина (до 10-15%). Для улучшения свойств формовочной смеси вводят специальные добавки. Так, для чугунного литья в качестве противопригарного компонента вводится каменноугольная пыль. В смесях для стального литья в качестве противопригарной добавки используют пылевидный кварц.

При заливке металла стержни находятся в более тяжелых условиях, испытывая значительное термическое и механическое воздействие расплавленного металла. Поэтому к стержневым смесям предъявляют более высокие требования по прочности. С этой целью в стержневые смеси добавляют в качестве связующих растворы растительных масел и канифоли в Уайт-спирите, силикатные клеи и другие материалы.

Приготовление песчано-глинистых смесей включает несколько операций: сушка песка и глины (при температуре 200-250 °C), размол угольного и кварцевого порошка, перемешивание компонентов и увлажнение. Для выполнения этих операций требуются специальные сушильные печи и смесители.

Ручная формовка

Ручная формовка – главный способ изготовления форм в литейном производстве, связанная с тяжелой и трудоемкой работой. Наиболее распространенный способ ручной формовки в двух опоках показан на рис. 3.3. Применяется в производстве мелких и средних отливок в единичном и мелкосерийном производстве.

Машинная формовка

Машинная формовка применяется в массовом и крупносерийном производстве. Машинная формовка во много раз увеличивает производительность труда, облегчает условия работы.

По характеру уплотнения смеси различают несколько способов машиной формовки.

Уплотнение прессованием показано на рис. 3.6.

Рис. 3.6. Схема машинной формовки прессованием

Сжатый воздух подается в нижнюю часть цилиндра один, при этом прес-сованный поршень 2 и стол 3 с прикрепленной к нему модельной плитой 4 поднимаются (рис. 3.6, а). Колодка 7, закрепленная на траверсе 8, входит внутрь наполнительной рамки 6 (рис. 3.6, б) и уплотняет формовочную смесь в опоке 5 (рис. 3.6, в). Плотность формовочной смеси уменьшается по мере удаления от прес-сованной колодки из-за трения смеси по стенке опоки. Поэтому прес-сование используют для уплотнения смеси в опоках высотой не более 200 – 250 мм.

Уплотнение встряхиванием (рис. 3.7.) Производится на специальных встряхивающих машинах и позволяет уплотнять высокие, сложные конфигурации формы.

Рис. 3.7. Схема машинной формовки встряхиванием

Сжатый воздух подается в нижнюю часть цилиндра 1 (рис. 3.7, а), при этом встряхивающий поршень 2 открывает выхлопные окна 7 (рис. 3.7, б). Воздух выходит в атмосферу, давление под поршнем снижается, и стол 3 укрепленной на нем модельной плитой 4 подает, ударяясь о торец цилиндра 8 (рис. 3.7, в). Скорость стола и модельной плиты падает до нуля, а формовочная смесь в опоке 5 и наполнительной рамке 6 продолжает двигаться вниз по инерции и по этому уплотняется. Когда канал 9 встряхивающего поршня окажется против отверстия 10, сжатый воздух снова войдет в полость цилиндра. Это повлечет новый подъем стола и новый удар его о торец и т.д.

Встряхивающий стол совершает 120 – 200 ударов в минуту. При этом способе свои формовочной смеси будут иметь наибольшую плотность у модельной плиты. Встряхиванием уплотняют формы высотой до 800 мм. Для уплотнения верхних слоев формы встряхивание совершают прес-сованием.

Для уплотнения смеси при получении крупных отливок применяются *пескометы* (рис. 3.8.). Рабочий орган пескомета – метательная головка – выбрасывает порции формовочной смеси на рабочую поверхность модельной плиты. В стальном кожухе 1 метательной головки превращается закрепленный на малу электродвигателе ротор 4 с ковшом 5. Формовочная смесь подается в головку не прерывно ленточным конвейером 3 через окно в задние стенки кожуха превращении ковша со скоростью 1000 – 1200 оборотов/мин. формовочная смесь собирается в пакеты 5 и центробежной силой выбрасывается через выходное отверстие в опоку 6. Попадая на модель 7 и модельную плиту 8, смесь за счет кинематической энергии равномерно уплотняется по высоте опоки. Материальная головка может перемещаться над опокой, управление работой пескомета автоматизировано. Пескомет высокопроизводительная машина, его применяют для уплотнения крупных литейных форм.

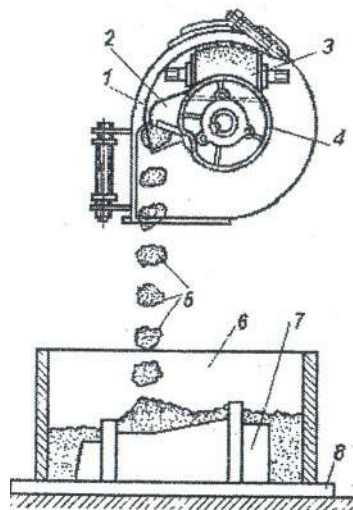


Рис. 3.8. Схема уплотнения форм пескометом

3.1.4. Техничко-экономическое обоснование литья в песчано-глинистые формы

Преимуществом литья в земляные формы является универсальность способа. Этим способом получают отливки любой конфигурации, из любых металлов и любой массы. Формовочные материалы не дефицитные и дешевы.

Недостатки способа: грубая поверхность отливки, большой припуск на механическую обработку, большой расход металла на литники, очень низкие санитарно-гигиенические условия труда.

Применяется способ в индивидуальном и массовом производстве во всех отраслях промышленности.

3.2. Специальные способы литья

В современном литейном производстве все более широкое применение получают специальные способы литья. Эти способы позволяют получать отливки повышенной прочности и с чистой поверхностью, часто не требующие механической обработки, чего нельзя добиться при литье в песчаные формы. Кроме того, некоторые из специальных способов литья обеспечивают значительно более высокую культуру труда, лучшие санитарно-гигиенические условия и более высокий уровень механизации и автоматизации, чем литье в песчаные формы.

3.2.1. Литье в оболочковые формы

Отливки получают в тонкостенных формах-оболочках толщиной 6-15 мм, изготовленных из высокопрочных песчано-смоляных смесей. Смесь состоит из кварцевого песка и 6-7% синтетической смолы в виде порошка. Фенолформальдегидная смола при 70 °C размягчается, а при температуре выше 120 °C плавит-

ся, превращаясь в клейкую массу. При температуре 200-300 °С смола становится твердой и при повторном нагреве не расплавляется. При 450 °С смола выгорает. На этих свойствах смолы основана технология изготовления оболочковой литейной формы, рис. 3.9.

Формовочную смесь 3 засыпают в бункер 2 (рис. 3.9, а) и накрывают нагретой металлической плитой 1 с укрепленными на ней моделями отливок. При повороте бункера на 180° (рис. 2.3, б) частицы смолы начинают плавиться под действием тепла нагретых моделей. Образуется оболочка 4. Толщина этой оболочки зависит от температуры подмодельной плиты и времени ее выдержки под засыпкой.

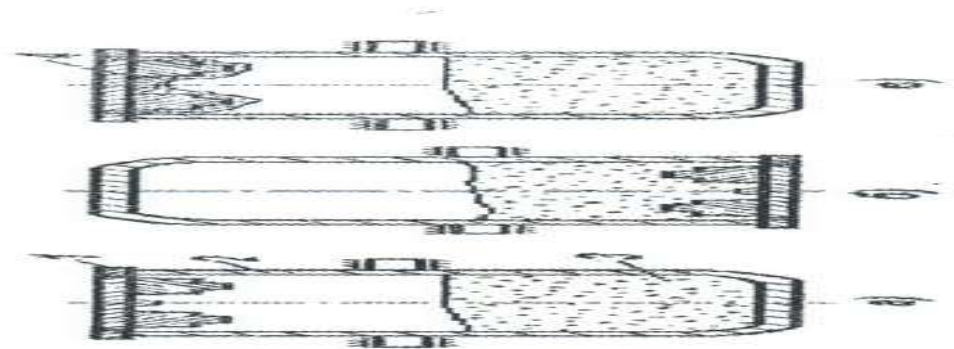


Рис. 3.9. Последовательность изготовления оболочковой формы

Через 25 с толщина оболочки достигает 6-8 мм, после чего бункер возвращают в исходное положение. Плита при этом оказывается вверху, избыток смеси, состоящей из песка и оставшейся не оплавленной смолы, осыпается на дно бункера (рис. 2.9, в). Модельную плиту вместе с оболочкой снимают с бункера и помещают в электропечь или газовую печь для полного затвердевания оболочки. Через 4 мин. Плиту вынимают из печи, укладывают на стол специального съемочного механизма и с помощью толкателей, проходящих через отверстия в плите и упирающихся в оболочку, отделяют оболочку от плиты и поднимают ее. С толкателей оболочка снимается и направляется на сборку. Две половины оболочки склеивают и соединяют скобкой. Полученную оболочковую форму из песчано-смоляной смеси после заливки металлом легко разрушается, освобождая отливку.

Для крупных отливок, из-за опасности прорыва металла во время заливки, оболочковые формы помещают в опоку и засыпают чугуновой дробью. В промышленности внедрены многопозиционные карусельные автоматы для изготовления оболочковых форм.

Технико-экономическое обоснование литья в оболочковые формы

Преимущества:

Литье отличается высокой чистотой поверхности и точностью размеров. Хорошая газопроницаемость формы обеспечивает отсутствие газовых пор. Легко удаляются отливки из формы, т.к. при выгорании смолы создается тонкая газовая рубашка, которая защищает поверхность отливки от пригара смеси. Форма легко разрушается. Расход формовочной смеси в 5-10 раз меньше, чем при литье в земляные формы.

Недостатком способа является дороговизна и дефицит эпоксидной смолы, а также ограничение размера и массы отливок.

Применяется способ для отливки чугунных коленчатых валов автомобилей, чугунных ребристых цилиндров для тяжелых мотоциклов, литого режущего инструмента и других отливок.

3.2.2. Литье по выплавляемым моделям

Этим способом изготавливали литые скульптуры много столетий назад. В машиностроении его начали применять в 40-х годах нашего века на рис. 2.10 приведена схема технологического процесса изготовления литейной формы по методу выплавляемых моделей.

Пресс-форму (рис. 3.10, б) для получения выплавляемых моделей отливки (рис. 3.10, а) изготавливают металлической или пластмассовой. Легкоплавкую смесь (50 % парафина и 50% стеарина) расплавляют в электрической печи (рис. 3.10, в) и заливают в пресс-форму (рис. 3.10, г). После затвердевания легкоплавкую модель (рис. 3.10, д) вынимают из пресс-формы, собирают модели в блоки с общей литниковой системой (рис. 3.10, е) и погружают блок в огнеупорную суспензию, состоящую из 30 % гидролизованного раствора этилсиликата (обладает большой клейкостью) и 70 % кварцевой муки. Затем блок моделей посыпают сухим песком и сушат на воздухе. Повторяя эти операции несколько раз, получают форму толщиной 5-8 мм (рис. 3.10, ж).

Рис. 3.10. Изготовление литейной формы методом выплавляемых моделей

Модель выплавляется из формы с помощью горячего воздуха, пара при 120 - 150 °С или горячей воды. Для крупных отливок облицованную и просушенную форму с литниковой системой помещают в металлический жакет, засыпают песком и уплотняют или засыпают металлической дробью.

Готовую форму прокаливают до температуры 850 - 900 °С, при которой остатки легкоплавкого состава выгорают. Форма при этом превращается в прочную керамическую оболочку.

Форму заливают расплавом. При необходимости расплав подают в форму под действием центробежных сил.

После затвердевания металла блоки отливок выбивают из опок. Керамическую корку отбивают. Для удаления керамической корки из отверстий и внутренних каналов отливки выщелачивают при 120 °С в ванне с щелочным раствором, затем промывают их в горячей воде. После контроля отливок отрезают литники и зачищают их остатки. На многих заводах при литье по выплавляемым моделям все процессы изготовления отливок механизированы и автоматизированы.

В промышленности применяют следующие способы получения тонких отливок: литьем по выжигаемым, растворяемым, размораживаемым и по газифицируемым моделям. Все это – разновидности способа литья по выплавляемым моделям. Наиболее перспективным из них является способ с применением моделей из пенопласта (пенополистирола) или, как его называют, *литье по газифицируемым моделям*.

Особенность литья по пенопластовым моделям – применение неразъемных форм, из которых модель не извлекается, а газифицируется за счет теплоты расплавленного металла. Таким способом получают отливки массой от 0,2 кг до нескольких тонн из стали, чугуна, медных и алюминиевых сплавов в единичном и серийном производстве.

Пенополистирол, из которого изготавливают модели, имеет малую плотность, разлагается при 300 - 350 °С, выделяя пары стирола, легко обрабатывается даже простым ножом и разогретой проволокой.

В единичном производстве пенопластовые модели изготавливают механической обработкой вручную или на станках.

Экономическая эффективность способа особенно значительна в производстве крупных сложных отливок.

Технико-экономическое обоснование литья по выплавляемым моделям

Преимущества. Отсутствие у формы разъема обеспечивает повышенную точность. Важным преимуществом способа является возможность получения отливок самой сложной конфигурации практически из любых сплавов.

Высокая точность и чистота отливки позволяет исключить механическую обработку.

Недостатком способа является длительный технологический процесс и высокая стоимость отливки.

Применяется способ в массовом и серийном производстве. Способ незаменим при изготовлении отливок из труднообрабатываемых сплавов (жаропрочных, магнитных, инструментальных), лопаток реактивных двигателей, челноков швейных машин и т. п.

3.4.3. Литье в металлические формы

Металлические формы (*кокили*) изготавливают из чугуна, стали и других сплавов. В кокилях получают 45 % всех алюминиевых и магниевых отливок, 11 % чугуновых отливок, 6 % стальных отливок.

Конструкции кокилей очень разнообразны, они могут быть неразъемными и разъемными, но чаще всего кокиль изготавливают из двух половин. Плоскость разъема может быть вертикальной и горизонтальной. Внутренняя, рабочая часть кокиля соответствует внешней конфигурации отливки. После затвердевания металла кокиль раскрывают и из него вынимают отливку.

Чтобы уменьшить скорость охлаждения отливок, избежать образования закаленного слоя и повысить стойкость кокиля, на его внутреннюю поверхность наносят теплоизоляционные, противопригарные покрытия. Их готовят из огнеупорных материалов (кварцевой муки, молотого шамота, графита, мела, талька и др.) и связующего материала (жидкого стекла, сульфитного щелока и др.). После нанесения покрытия кокиль подвергается подсушке и прокатке.

В зависимости от толщины и свойств применяемых покрытий кокили подразделяются на кокили с *тонкослойным покрытием* толщиной до 0,5 мм (для цветных металлов) и кокили *футерованные* с толщиной покрытия до 10 мм (для крупных отливок из чугуна и стали). Технологический процесс изготовления отливки в кокиле показан на рис. 3.11.

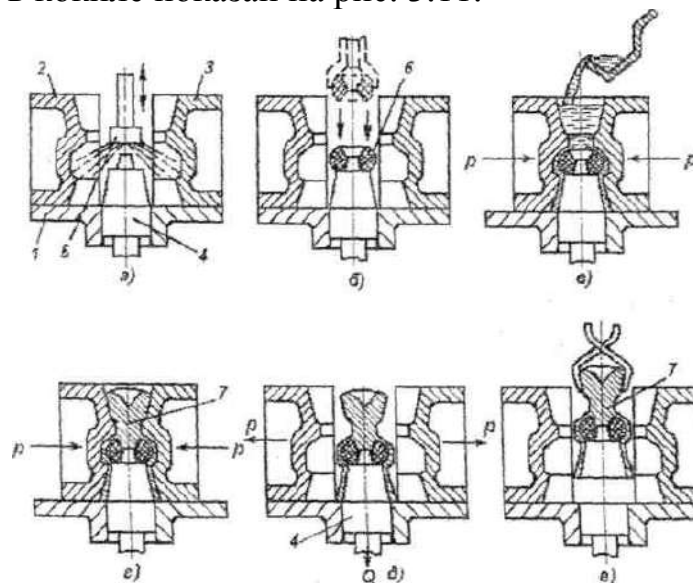


Рис. 3.11. Последовательность операций изготовления отливок в кокилях

Кокиль с вертикальным разъемом состоит из поддона 1, двух симметричных полуформ 2 и 3 и металлического стержня 4. Кокиль предварительно нагревают до температуры 150 - 180 °С, покрывают рабочую поверхность из пульверизатора 5 слоем защитного покрытия толщиной 0,3-0,8 мм (рис. 3.11, а). С помощью манипулятора устанавливают песчаный стержень 6 (рис. 3.11, б) для получения расширяющейся полости в отливке. Половины 2 и 3 кокиля со-

единяют, скрепляют и заливают расплав (рис. 3.11, в). После затвердевания отливки 7 (рис. 3.11, г) и охлаждения ее до температуры выбивки кокиль раскрывают (рис. 3.11, д) и протягивают вниз металлический стержень 4. Отливка 7 удаляется из кокиля (рис. 3.11, е).

Полости в отливках оформляют песчаными, оболочковыми или металлическими стержнями. Песчаные стержни используют для получения отливок из чугуна, стали и цветных сплавов, а металлические - для получения отливок из алюминия и магния.

Для литья в кокиль применяют одно- и многопозиционные автоматические кокильные машины.

Технико-экономическое обоснование литья в металлические формы.

Кокиль - форма многократного использования. В нем можно получать до 300 стальных отливок, несколько тысяч отливок из алюминиевых сплавов.

Преимущества. Кокиль обеспечивает получение отливок с высоким качеством металла, повышенной точностью и чистотой поверхности. При этом способе улучшаются санитарно-гигиенические условия труда, есть возможность полной автоматизации процесса. К недостаткам способа относятся высокая стоимость кокиля и трудоемкость его изготовления. Можно отливать детали только относительно простой конфигурации. При литье в металлические формы из-за быстрого охлаждения уменьшается жидкотекучесть расплава. Возможно возникновение газовой пористости из-за отсутствия газопроницаемости формы.

Литье в металлические формы применяется и как самостоятельный способ, и в других способах литья (литье под давлением, центробежное литье).

Кокили применяют, в основном, для получения отливок из цветных металлов и сплавов, реже - из стали и чугуна.

3.4.4. Литье под давлением

Литье под давлением - наиболее производительный способ изготовления отливок из цветных металлов с высокой точностью и чистотой поверхности.

Расплавленный металл заполняет стальную пресс-форму под давлением поршня до 3000 атм., быстро затвердевает и образует отливку.

Наибольшее распространение получили машины с холодной и горячей камерой прессования.

Машина с холодной камерой прессования показана на рис. 3.12. Дозу расплавленного металла заливают в горизонтальную камеру прессования 1 и подают поршнем 2 в пресс-форму, состоящую из двух полуформ: подвижной 3 и неподвижной 4. Для образования полости в отливке применяют металлический стержень 5. После затвердевания отливки пресс-форма раскрывается, и отливка удаляется при помощи толкателей 6. Давление поршня на жидкий металл составляет от 400 до 2000 кгс/см², масса отливок - до 45 кг.

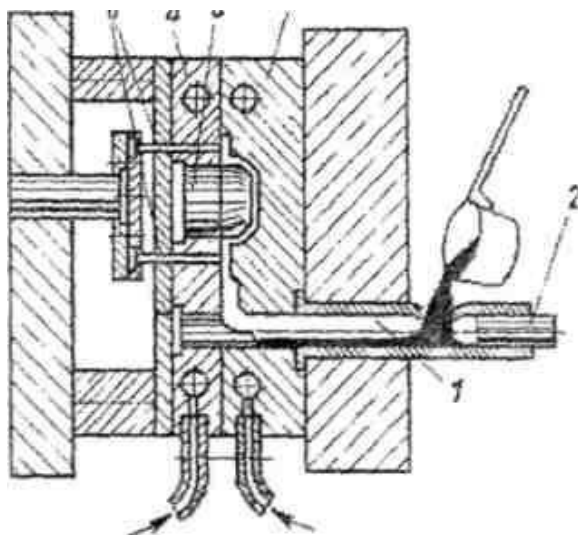


Рис. 3.12. Схема машины с холодной камерой прессования

Поршневые *машины с горячей камерой прессования* (рис. 3.13) развивают давление на металл 100-300 кгс/см². Особенность их устройства состоит в том, что камеру прессования 1 располагают в обогреваемом тигле с жидким металлом. При верхнем положении плунжера 3 через отверстия 2 сплав заполняет камеру. При движении плунжера 3 вниз он перекрывает эти отверстия, сплав под давлением заполняет полость пресс-формы 4. После затвердевания отливки плунжер возвращается в исходное положение, остатки металла из канала сливаются в камеру прессования. Отливка удаляется из пресс-формы толкателями.

Такие машины применяют для литья из свинцово-сурьмянистых, цинковых, магниевых и алюминиевых сплавов с невысокой температурой плавления, не взаимодействующих с материалами тигля и камеры прессования.

Благодаря малому охлаждению сплава при заполнении пресс-формы на таких машинах можно производить очень мелкие детали - массой до нескольких граммов

Обычно масса отливок не превышает 25 - 30 кг. Машины имеют очень высокую производительность - до 3000 и более отливок в час при работе в автоматическом режиме.

Особенности формирования отливок. При литье под давлением расплав заполняет пресс-форму с очень большой скоростью (за доли секунды) - при этом происходит быстрое закупоривание вентиляционных каналов пресс-формы, и из ее полости не полностью удаляются воздух и газы, образующиеся при испарении и сгорании смазки. В затвердевшей отливке появляется газовая пористость.

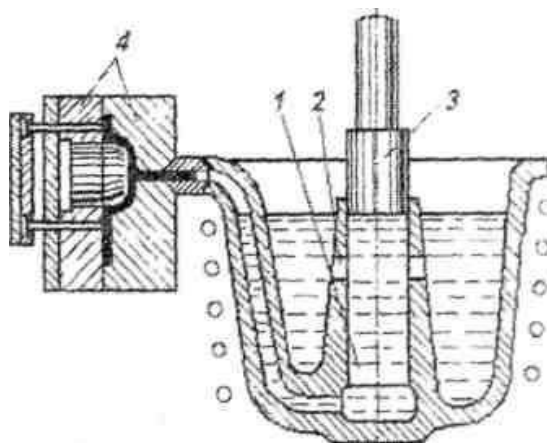


Рис. 3.13. Машина с горячей камерой прессования

Технико-экономическое обоснование литья под давлением

Преимущества. Это самый высокопроизводительный способ литья (до 3000 и более отливок в час). Дает высокую точность и чистоту поверхности отливки. Высокая степень автоматизации процесса позволяет встраивать участок для литья под давлением в автоматические линии.

Недостатками способа являются высокая стоимость оборудования и пресс-форм, ограниченная масса отливок, газоусадочная пористость отливок. Применяется способ в массовом производстве для отливки корпусов электродвигателей из силумина, блоков цилиндров двигателя внутреннего сгорания, а также для литья из других цветных сплавов.

3.4.5. Центробежное литье

При этом способе отливки получают свободной заливкой в вращающиеся формы. Отливки формируются под действие центробежных сил. Центробежные силы отбрасывают, заливаемый металл к стенкам формы, где он затвердевает, образуя пустотелую отливку. Центробежным литьем в промышленности получают чугунные и стальные трубы, кольца и другие отливки типа тел вращения. При этом способе литья исключается применение стержней для образования полостей в цилиндрических отливках. Отливки отличаются с большой плотностью и высокими механическими свойствами. Центробежным литьем можно получать тонкостенные отливки из сплавов с низкой жидкотекучестью.

К недостаткам центробежного литья относится трудность получения качественных отливок из сплавов, склонных к ликвации, и невозможность выполнения отверстий точных размеров. Размеры отверстий отливок, изготавливаемых этим способом, зависят от количества залитого в форму металла.

Формы приводят во вращение специальными машинами, называемыми центробежными. В зависимости от расположения оси вращения формы в пространстве различают машины с горизонтальной и вертикальной осями вращения.

На машинах с горизонтальной осью вращения отливки получают со стенками равномерной толщины по длине и в поперечном сечении. На них отливают короткие и длинные трубообразные отливки.

На рис. 3.14. изображена схема машины с горизонтальной осью вращения форм для изготовления труб. Металл из ковша 4 заливают в форму 2 через желоб 3. Попадая на внутреннюю стенку вращающейся формы 2, жидкий металл образует вокруг нее полу цилиндрическую отливку 5, которую после затвердевания извлекают из формы.

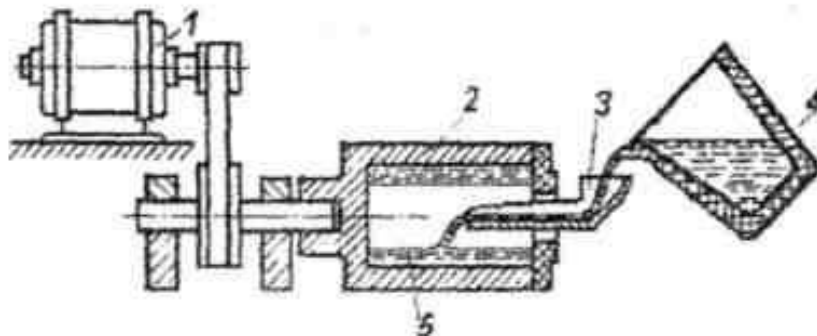


Рис. 3.14. Центробежная машина с горизонтальной осью вращения

В машинах с вертикальной осью вращения (рис. 3.15) металл из ковша 1 заливают в форму 2 крепленную на шпинделе 3, который вращается от электродвигателя

Металл центробежной силой прижимается к боковой цилиндрической стенке образуя возле нее жидкий кольцевой слой 4. Форма вращается до полного затвердевания металла, после чего ее останавливают, извлекают отливку.

При вертикальной оси вращения формы отливки имеют параболическую внутреннюю поверхность. Толщина верхней части отливки меньше, чем нижней части, так как при вращении формы часть металла стекает вниз. Этим методом литья получают отливки небольшой высоты.

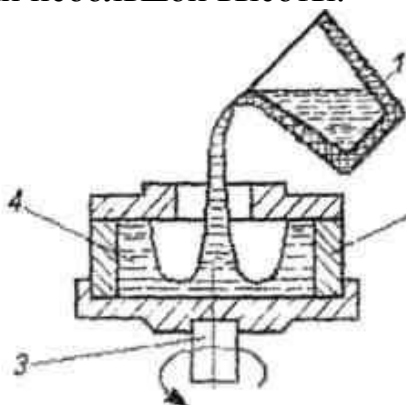


Рис.3.15 . Схема центробежной машины с вертикальной осью вращения

Технико-экономическое обоснование центробежного литья

Преимуществом способа является возможность получения пустотелых отливок без применения стержней, получение плотной и мелкозернистой

структуры.

Недостатком способа является высокая стоимость оборудования. Применяется способ для отливки труб, колец, гильз из стали, чугуна и других сплавов.

3.4.6. Другие способы литья

Непрерывное литье показано на рис. 3.16. Жидкий металл, поступающий из тигля 1, быстро затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе 2 и образует непрерывную заготовку 3, которую вытягивают с определенной скоростью тянущими роликами 4 и разрезают дисковой пилой 5 на куски.

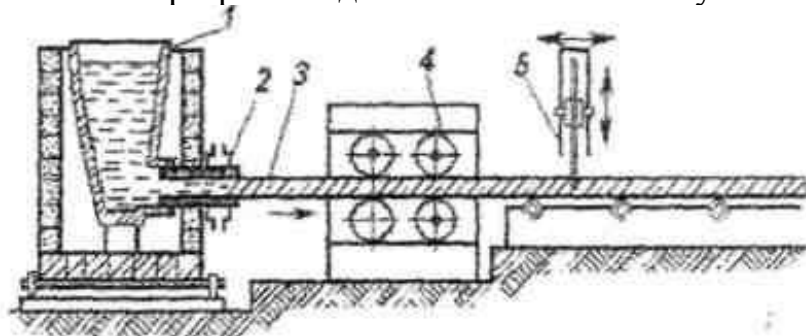


Рис. 3.16. Схема установки непрерывного литья

Этим способом получают отливки с параллельными образующими чугуна, медных, алюминиевых и других сплавов (рис. 3.17). Преимущество: благодаря направленному затвердеванию сплава отливки не имеют неметаллических включений, усадочных раковин пористости.

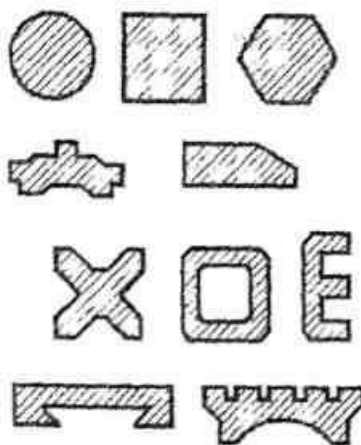


Рис. 3.17. Образцы отливок, полученных непрерывным литьем

Литье выжиманием (рис. 3.18) применяют для получения тонкостенных крупногабаритных отливок типа панелей размерами до 1000 - 2500 мм с толщиной стенки 2 - 5 мм из алюминиевых и магниевых сплавов. При повороте подвижной полуформы 1 залитый между полуформами жидкий металл заполняет полость 2 формы, его излишек выжимается в приемный ковш 3. Приведенная

на схеме установка имеет угловое перемещение подвижной полуформы, существуют также установки с плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы, те и другие автоматизированы.

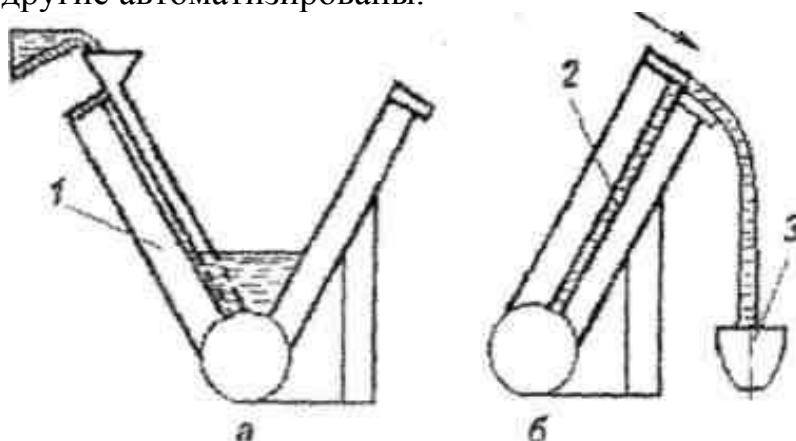


Рис. 3.18. Схема литья выжиманием

Литье вакуумным всасыванием (рис. 3.19). Водоохлаждаемая литейная форма 3, опирающаяся на керамический поплавок 2, заполняется расплавленным металлом из раздаточной печи 1 за счет разрежения, создаваемого в форме вакуумным насосом. Во время непродолжительной выдержки формируется отливка 4. Затем полость формы соединяется с атмосферой, и незатвердевший металл сливается обратно в печь.

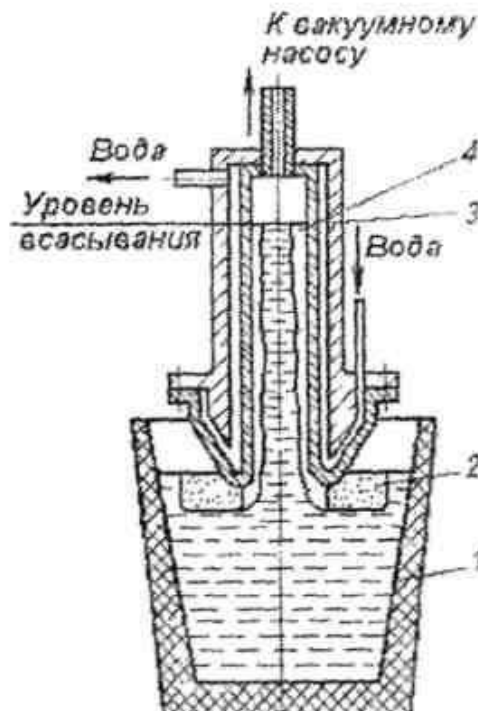


Рис. 3.19. Схема литья вакуумным всасыванием

Способ применяется для получения втулок, вкладышей подшипников скольжения и других отливок простой формы из дорогих и дефицитных бронз и

латуней.

Преимущество получение качественных отливок без расхода металла на литники и прибыли. *Литье намораживанием* (рис. 3.20, а)-Суть способа в том, что образование отливки происходит в результате последовательного затвердевания металла - его «намораживания» на затравку.

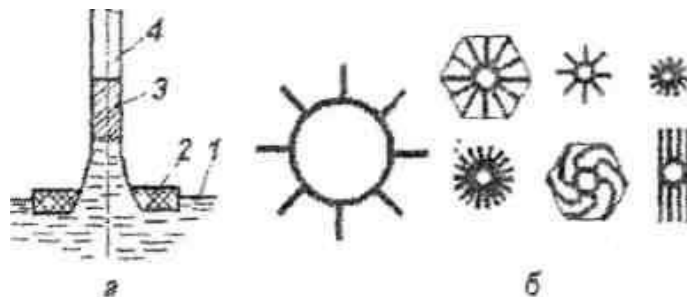


Рис. 3.20. Схема литья намораживанием (а) и примеры сечений отливок, полученных намораживанием из расплава (б)

На поверхность жидкого металла 1 помещают керамический поплавок 2 с отверстием, соответствующим сечению отливки. В мениск выступающего из отверстия металла вводят затравку 4. При ее подъеме из отверстия поплавок за счет сил поверхностного натяжения постепенно вытягивается жидкий металл, затвердевающий ("намораживающийся") и образующий отливку 3. Скорость вытягивания изделия должна быть точно согласована со скоростью охлаждения и затвердевания металла

Способ применяется для получения лент шириной 100 мм и более, труб с внутренними и наружными ребрами и других изделий сложного профиля из алюминиевых сплавов (рис. 3.20, б). *Жидкая прокатка* (рис. 3.21) - это совмещенный способ литья и прокатки.

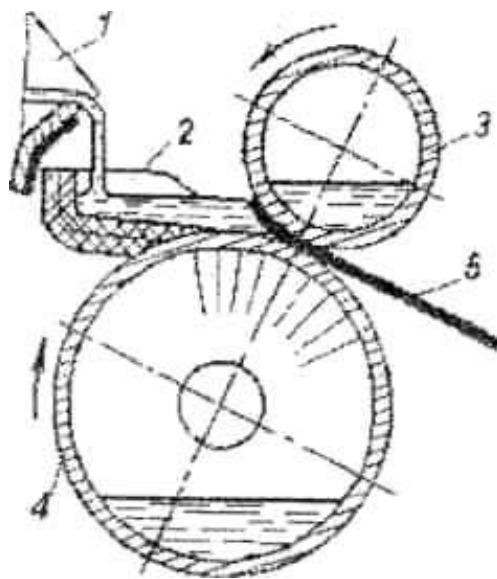


Рис. 3.21. Схема жидкой прокатки

Жидкий металл наливают из ковша 1 в приемник 2, из которого он поступает на поверхность охлаждаемых валков 3 и 4, вращающихся навстречу друг другу. В зазоре между валками происходит кристаллизация металла. Затвердевший металл 5 в пластичном состоянии выжимается из зазора в виде ленты. Так получают ленты и листы шириной до 750 мм и толщиной 0,7-2,5 мм из алюминия, чугуна и других сплавов. *Жидкая штамповка* (рис. 3.22) занимает промежуточное положение между литьем и горячей объемной штамповкой. Порцию жидкого металла 1 заливают в металлическую форму (матрицу) 2, в которую затем опускается металлический пуансон 3, выдавливающий металл и заставляющий его заполнить все полости формы. В результате между формой 2 и пуансоном 3 образуется отливка 4.

Способ пригоден для сплавов на медной, алюминиевой, магниевой и цинковой основе. Отливки приобретают высокую плотность и механические свойства благодаря интенсивному теплоотводу и горячему деформированию литой структуры в процессе кристаллизации.

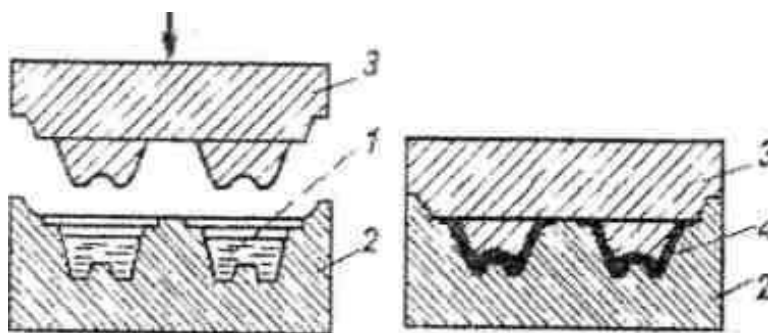


Рис. 3.22. Схема жидкой штамповки

Существует множество других, реже применяемых специальных способов литья. Каждый из этих способов имеет свои особенности, определяющие области применения и экономическую эффективность.

3.5. Дефекты отливок

Причин возникновения брака в литейном производстве очень много: некачественные формовочные материалы, плохое качество шихты, неудачная конструкция самой детали или литниковой системы, орошения технологии при формовке, заливке форм и охлаждении отливок.

Дефекты отливок приведены на рис. 3.23.

I группа - *несоответствия по геометрии*: недолив 1, вылом 2, перекос 3, разностенность 4;

II группа - *дефекты поверхности*: пригар 1, нарост 2, ужимина 3, залив 4;

III группа - *несплошности в теле отливки*: усадочные раковины 1, газовые раковины 2, пористость 3;

IV группа - *включения*: металлические 1, неметаллические (песчаные раковины) 2, королек 3.

Рассмотрим, что представляют собой некоторые виды дефектов. *Газовые раковины* (рис. 3.23, III, 2) - полости в теле отливок, созданные воздухом или газами, выделяющимися из жидкого металла при его затвердевании. Причинами их образования являются недостаточная газопроницаемость и повышенная влажность формовочной смеси, недостаточная дегазация металла перед заливкой.

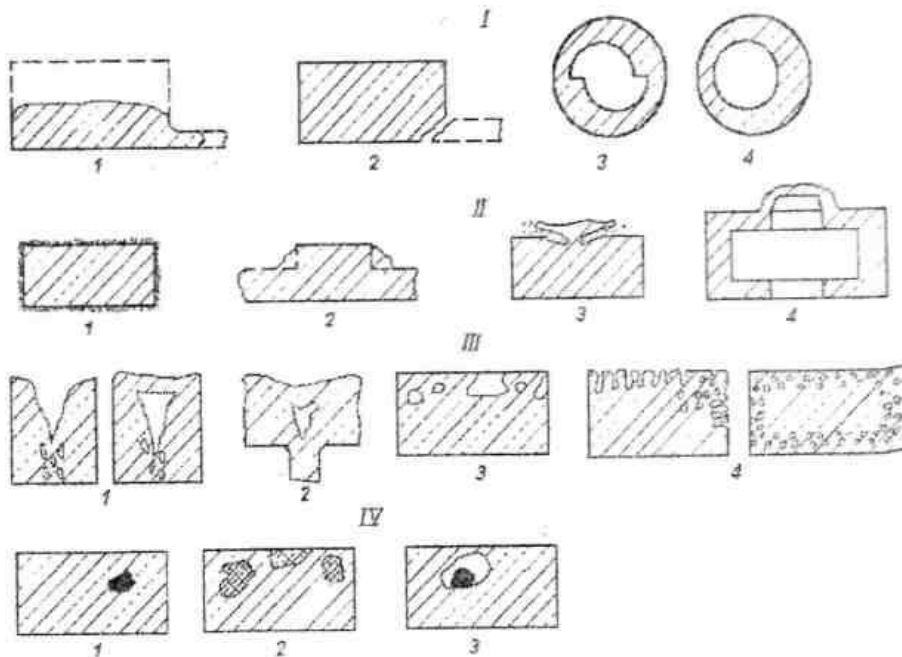


Рис. 3.23. Схема основных видов литейных дефектов

Усадочные раковины (рис. 3.23, III, 1) открытые или закрытые полости в теле отливки, которые обычно образуются в утолщенных местах отливки. Причинами образования усадочных раковин являются неправильный подвод металла в форму, а также заливка форм излишне перегретым металлом, неправильная конструкция отливки, допускающая скопление больших объемов металла в отдельных ее частях.

Схема образования усадочной раковины показана на рис. 3.24. Сначала около стенок литейной формы образуется корка 1 твердого металла. Так как усадка расплава при переходе из жидкого состояния в твердо превышает усадку корки, то уровень металла в не затвердевшей части отливки понижается до линии а - а. В следующий момент времени, а корке 1 нарастает новый твердый слой 2, а уровень жидкости понижается далее - до линии б - б. Так продолжается до тех пор, пока не закончится процесс затвердевания. Снижение уровня расплава при затвердевании приводит к образованию сосредоточенной усадочной раковины 3.

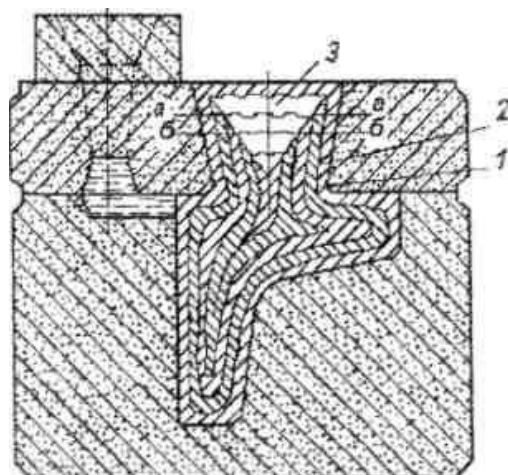


Рис. 3.24. Схема образования усадочной раковины

Этот дефект характерен для отливок из чистых металлов, сплавов эвтектического состава и сплавов с узким интервалом кристаллизации. усадочная пористость (рис. 3.23, III, 3) - скопление мелких пустот в обширной зоне отливки, образовавшихся в результате усадки при срастании кристаллов.

Схема образования усадочной пористости показана на рис. 3.24.

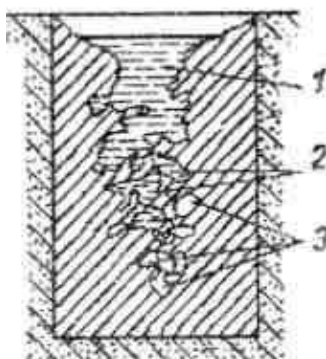


Рис. 3.25. Схема образования усадочной пористости

В разобщенных ячейках 2 между сросшимися кристаллами остатки жидкой фазы 1 кристаллизуются без доступа к ним питающего расплава, поэтому в каждой такой ячейке образуется маленькая усадочная раковина 3. Множество таких межзеренных раковин образует пористость.

Этот дефект характерен для отливок из сплавов с широким интервалом кристаллизации.

Песчаные раковины (рис. 3.23, IV, 2) - чаще всего открытые, различной формы пустоты в теле отливки, частично или целиком заполненные формовочной смесью. Причинами образования песчаных раковин являются разрушение отдельных частей формы, смыв формовочной смеси расплавом при неправильном его подводе.

Холодные трещины - сквозные и несквозные разрывы в стенках отливки, небольшой ширины и значительной длины. Они образуются при низких температурах и имеют неокисленную поверхность. Причиной появления холодных трещин является усадка сплава, приводящая к большим внутренним напряже-

ниям. Для предупреждения их образования необходимо обеспечивать равномерное охлаждение отливок во всех сечениях, проводить отжиг отливок.

Горячие трещины - разрывы в стенках отливки, имеющие значительную ширину и небольшую протяженность. Они образуются при высокой температуре и имеют темную окисленную поверхность. Трещины могут возникать в случае недостаточной податливости стержней и отдельных частей формы, ранней выбивки отливки из формы.

Заливы (рис. 3.23, И, 4) - тонкие, различные по величине и форме, не предусмотренные чертежом выступы на отливке, образующиеся по плоскости разъема формы из-за наличия излишнего зазора между полу формами.

Пригар (рис. 3.23, II, 1) - трудно отделимый от поверхности отливки слой из металла, его оксидов и частичек формовочной смеси. Это результат взаимодействия прогретого материала формы с расплавом. Для устранения пригара снижают температуру заливки металла, на рабочую поверхность формы наносят противопригарные покрытия.

Недолив (рис. 3.23, I, 1) - неполное заполнение формы расплавом, что наблюдается при недостаточной его жидкотекучести, при скоплении газов, препятствующих заполнению формы, при недостаточных размерах питателей литниковой системы.

Перекося (рис. 3.23, I, 3) - несоответствие конфигурации отливки чертежу из-за смещения одной части отливки относительно другой. Перекося, как правило, является следствием неправильного центрирования опок при чрезмерном износе штырей.

Разностенность (рис. 3.23, I, 4) - разная толщина стенок отливки, причиной которой является неправильная установка или смещение стержней при заливке формы из-за непрочного их крепления в форме.

Коробление - искажение размеров и конфигурации отливки под влиянием внутренних напряжений, возникающих при неравномерном охлаждении отдельных ее частей. Для предупреждения короблений в отливках необходимо увеличивать податливость формы и создавать рациональную конструкцию отливки.

3.6. Отходы литейного производства

Литейное производство характеризуется наличием токсичных воздушных выбросов, сточных вод и твердых отходов. Острой проблемой в литейном производстве считается неудовлетворительное состояние воздушной среды. Наибольшее количество пыли выделяется оборудованием для выбивки форм и стержней. Для очистки выбросов от пыли применяют циклоны разных типов и скрубберы. Эффективность очистки в этих аппаратах находится в пределах 20-95 %. Применение в литейном производстве синтетических связующих особенно остро ставит проблему очистки воздушных выбросов от токсичных веществ: фенола, формальдегида, оксидов углерода, бензола и др. Для обезвреживания

органических паров литейного производства применяют различные способы: термическое сжигание, каталитическое дожигание, адсорбцию активированным углем, окисление озоном, биоочистку и другие способы. Источником сточных вод в литейных цехах служат, главным образом, установки очистки литья, мокрой очистки воздуха, регенерации отработанных формовочных смесей. Огромное экономическое значение для народного хозяйства имеет утилизация сточных вод и шлама. Количество сточных вод можно значительно снизить путем применения оборотного водоснабжения.

Твердые отходы литейного производства, поступающего в отвалы, представляют собой, в основном, отработанные литейные пески. Незначительную часть (менее 10 %) составляют металлические отходы, керамика, бракованные стержни и формы, огнеупоры, бумажный и древесный мусор.

Основным направлением уменьшения количества твердых отходов в отвалы следует считать регенерацию отработанных литейных песков, что обеспечивает снижение расхода свежих песков, а также связующих и катализаторов. Разработанные технологические процессы регенерации позволяют получать песок с хорошим качеством и высоким выходом целевого продукта.

При отсутствии регенерации отработанные формовочные смеси, а также шлаки необходимо использовать в других отраслях промышленности: отработанные пески - в дорожном строительстве в качестве балластного материала для выравнивания рельефа и устройства насыпей; отработанные песчано-смоляные смеси - для изготовления асфальтобетона; мелкую фракцию отработанных формовочных смесей - для производства стройматериалов: цемента, кирпича, облицовочных плиток; отработанные жидкостекольные смеси - для строительных цементных растворов и бетона; шлак литейного производства - для дорожного строительства в качестве щебня; мелкую фракцию - в качестве удобрения.

Захоронение твердых отходов литейного производства целесообразно производить в овраги, отработанные карьеры и шахты.

3.3. Получение заготовок методами обработки металлов давлением

Процесс *обработки металлов давлением* - это придание материалу требуемой формы, размеров и физико-механических свойств без нарушения его сплошности путем пластической деформации. Существенными достоинствами ОМД являются: возможность значительного уменьшения отхода металла (до 20-70 %) по сравнению с обработкой резанием; возможность повышения производительности труда, т. к. в результате однократного приложения усилия можно значительно изменить форму и размеры деформируемой заготовки; изменение физико-механических свойств металла заготовки в процессе пластической деформации, которое можно использовать для получения деталей с наилучшими служебными свойствами (прочностью, жесткостью, сопротивлением износу и т. д.) при наименьшей их массе. Эти достоинства приводят к тому, что удель-

ный вес ОМД в металлообработке неуклонно растет. Совершенствование технологических процессов ОМД, а также применяемого для этих целей оборудования приводит к расширению номенклатуры деталей, изготавливаемых обработкой давлением, к увеличению диапазона деталей по массе и размерам, к повышению точности размеров полуфабриката, получаемого в результате ОМД.

Виды обработки металлов давлением

Процессы ОМД по назначению подразделяют на два вида:

1. для получения заготовок постоянного поперечного сечения по длине (прутков, проволоки, лент, листов и других профилей); основные разновидности - прокатка, прессование и волочение;
2. для получения заготовок, близких по форме и размерам к готовому изделию; основные разновидности - ковка и штамповка.

3.3.1. Теоретические основы обработки металлов давлением

Обработка металлов давлением основана на способности металлов в определенных условиях получать пластические деформации в результате воздействия внешних сил. *Деформацией* называется изменение форм и размеров тела под действием напряжений. Деформация, исчезающая после снятия нагрузки, называется *упругой*, а сохраняющаяся - остаточной, или *пластической*. При упругой деформации происходит обратимое смещение атомов из положений равновесия в кристаллической решетке. После снятия нагрузки, сместившиеся атомы за счет сил межатомного взаимодействия возвращаются в исходное равновесное положение, и кристаллы приобретают исходную форму и размеры. При пластической деформации атомы смещаются друг относительно друга на расстояния больше межатомных и занимают новые устойчивые положения. Тело принимает новую форму и размеры.

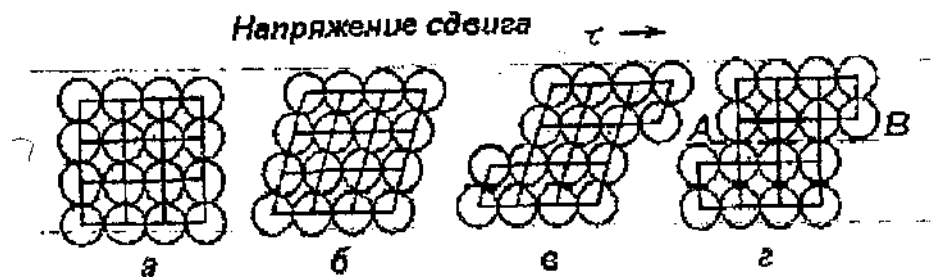


Рис. 3.26. Схема пластической деформации скольжением:

- а - исходное состояние кристалла; б - упругодеформированное состояние;
в - упруго- и пластически деформированное состояние; г - состояние после пластической (остаточной) деформации по плоскости АВ

Процесс пластической деформации обычно представляет собой процесс скольжения одной части кристалла относительно другой по кристаллографиче-

ским плоскостям скольжения с более плотной упаковкой атомов (рис. 3.26). В таких условиях атомы не выходят из зоны силового взаимодействия, и деформация происходит без нарушения сплошности (без образования трещин, разрывов).

При пластической деформации поликристаллических тел кристаллиты (зерна) меняют свою форму и ориентировку, образуя волокнистую структуру с преимущественной ориентировкой кристаллов. Зерна деформируются и сплющиваются, вытягиваясь в направлении деформации (рис. 3.27).

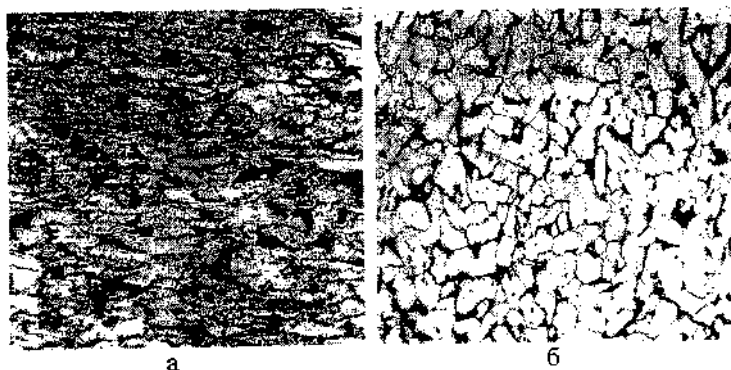


Рис. 3.27. Микроструктура металла:
а - после холодной деформации; б - в исходном состоянии

Преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен вдоль направления деформации называется *текстурой*. Образование текстуры способствует появлению анизотропии свойств вдоль и поперек направления волокон.

С ростом степени деформации увеличивается число дефектов кристаллического строения в металле, что оказывает значительное влияние на механические и физико-химические свойства: механические свойства, характеризующие сопротивление деформации (σ_B , HB), повышаются, а свойства, характеризующие способность к пластической деформации (δ , ψ), падают (рис. 3.28).

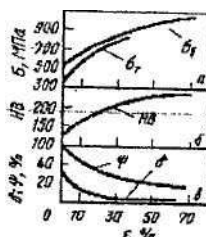


Рис. 3.28. Влияние степени пластической деформации на механические свойства низкоуглеродистой стали

Упрочнение металла под действием пластической деформации называется *наклепом*. Если наклепанный металл нагреть, т. е. сообщить атомам дополнительную энергию, они получают возможность занять новые положения равно-

весия, т. е. построить новую кристаллическую решетку с небольшим (гораздо меньшим) количеством дефектов. Образование новых зерен взамен продеформированных называется *рекристаллизацией*. В результате рекристаллизации наклеп металла снимается, и свойства приближаются к исходным. Плотность дефектов кристаллического строения также уменьшается до первоначального уровня (рис. 3.4).

Абсолютная температура рекристаллизации для технически чистых металлов равна:

$$T_{\text{рекр.}} = 0,4 * T_{\text{пл.}}, K.$$

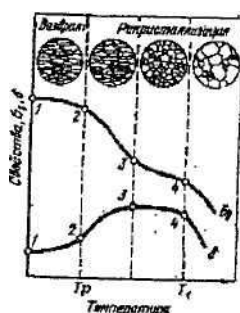


Рис. 3.29. Схема изменения структуры и свойств наклепанного металла при нагреве:
1 - 2 - возврат; 2 - 3 - первичная рекристаллизация; 3 - 4 – собирательная рекристаллизация

Деформация при температурах ниже температуры рекристаллизации называется *холодной деформацией*; а при температурах выше $T_{\text{рекр.}}$ – *горячей деформацией* (новые зерна образуются по всему объему металла в ходе деформации). Таким образом, холодная деформация сопровождается наклепом металла, а при горячей деформации одновременно идут упрочнение за счет пластической деформации и разупрочнение при рекристаллизации. При горячей деформации сопротивление деформированию k в 10 раз меньше, чем при холодной деформации, а пластичность резко возрастает, что позволяет добиваться больших степеней деформации с меньшими усилиями. Поэтому горячую деформацию целесообразно применять для изготовления крупных деталей, при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла (слитков). Однако из-за образования слоя окисленного металла на поверхности – *окалины* – ухудшается качество поверхности и точность получаемых размеров, а также происходит *угар* металла.

Холодная деформация позволяет достичь высокой точности и чистоты поверхности заготовки, а также управлять свойствами, создавая разную степень наклепа.

Возможность пластического деформирования не безгранична. Основными факторами, влияющими на величину пластической деформации, которой можно достичь без разрушения (предельная деформация), являются механические характеристики металла (сплава), температурно-скоростные условия де-

формирования и схема напряженного состояния. Схемы напряженного состояния в различных процессах и операциях обработки давлением различны, вследствие чего для каждой операции ОМД, для каждого металла и температурно-скоростных условий имеются свои предельные деформации.

Зависимость свойств деталей от направления волокон в металле

Исходной заготовкой для начальных процессов ОМД (прокатки, прессования) является слиток. Если слиток загрязнен неметаллическими включениями, обычно располагающимися по границам кристаллитов, то в результате обработки давлением включения вытягиваются в виде прядей (*волокон*) по направлению наиболее интенсивного течения металла, придавая металлу волокнистое строение, которое при соответствующей обработке поверхности наблюдается невооруженным глазом (рис. 3.30).

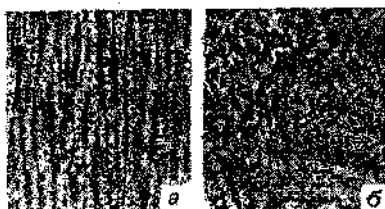


Рис. 3.30. Макроструктура металла:
а - после обработки давлением; б – исходного литого

Металл с явно выраженной волокнистой структурой характеризуется анизотропией механических свойств. Вдоль волокон механические характеристики (δ , Ψ , КС) выше, чем поперек.

Так как направление волокон зависит от характера деформирования заготовки, желательно в готовой детали получить такое расположение волокон, при котором она имела бы наилучшие служебные свойства. Волокнистое строение не может быть разрушено термической обработкой и сохраняется даже при горячей деформации.

Нагрев металла под обработку давлением

Для проведения процессов горячей пластической деформации металл необходимо нагреть выше 0,65 - 0,75 абсолютной температуры плавления для повышения пластичности и снижения прочности (рис. 3.31). Нагревать сталь до температур, близких к температуре плавления, нельзя, так как наступает *пережог*, выражающийся в окислении и оплавлении границ зерен, нарушении связей между ними и, как следствие, полной потере пластичности. Пережог является неисправимым браком.

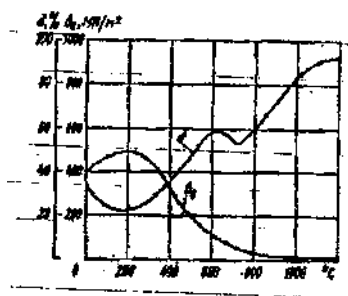


Рис. 3.31. Изменение механических свойств стали, содержащей 0,15 % С, в зависимости от температуры

Ниже температуры пережога лежит зона перегрева. Явление *перегрева* заключается в резком росте размеров зёрен и, как следствие, снижении механических свойств продеформированных изделий.

Брак по перегреву можно исправить отжигом. Таким образом, максимальную температуру нагрева, т. е. температуру начала горячей обработки давлением, следует назначать такой, чтобы не было ни пережога, ни перегрева. Заключать горячую обработку давлением следует также при вполне определенной температуре. Если продолжать деформирование при более низких температурах, металл упрочнится), кристаллизация не успевает произойти), и вследствие падения пластичности в изделии могут образоваться трещины. Таким образом, каждый металл и сплав имеет свой строго определенный *температурный интервал горячей обработки давлением* (табл. 3.1).

Табл. 3.1.

Температурный интервал горячей обработки сплавов давлением

Сплав	Температурный интервал, °С		Сплав	Температурный интервал, °С	
	Начало	Конец		Начало	Конец
Углеродистые стали:			Магниевого сплавы:		
10	1280	750	МА1, МА2	420	300
45	1200	800	МА5	390	280
Легированные стали:			Медные сплавы:		
ШХ15	ИЗО	850	Бр.АЖМц 10-3-1,5	900	750
12Х18Н9Т	1150	900	ЛС60-1	820	700
30ХГСА	1140	830	Титановый сплав		
Алюминиевые сплавы:			BT8	1100	900
Д1, АК8	470-440	400			
АК4	470-420	350			

Нагрев желательно осуществлять с наибольшей скоростью, т. е. за возможно короткое время. При этом в меньшей степени происходит рост зерна,

снижаются отходы металла на угар (образование окалины за счет взаимодействия с кислородом атмосферы печи), меньше углерода выгорает с поверхности стальных заготовок. Температура посадки металла в нагревательное устройство и скорость нагрева определяются его пластичностью и теплопроводностью в соответствующем температурном интервале.

В процессе нагрева возникает перепад температур между внутренними и наружными зонами заготовки, сопровождаемый возникновением термических напряжений. Эти напряжения при недостаточной пластичности металла могут привести к возникновению трещин. Разность температур по сечению увеличивается с увеличением скорости нагрева, поэтому существует максимально допустимая скорость нагрева:

$$T = K \cdot D \sqrt{D},$$

где T - время нагрева, ч; D - диаметр или толщина заготовки, м; K - коэффициент, равный для углеродистой и низколегированной стали 12,5, для высоколегированной - 25.

Существенное значение имеет также и режим охлаждения готовых поковок. Слишком быстрое и неравномерное охлаждение может привести к образованию трещин или к короблению вследствие термических напряжений. Чем меньше теплопроводность стали и чем массивнее и сложнее конфигурация изделия, тем медленнее должно быть охлаждение.

Нагревательные устройства

В современных процессах обработки металлов давлением нагрев заготовок осуществляют в пламенных и электрических печах, в установках контактного и индукционного электрического нагрева.

Нагрев в пламенных печах происходит за счет лучеиспускания, конвекции и теплопроводности металла. В электрических печах сопротивления металл нагревается за счет лучеиспускания тепла от нагревательных элементов электросопротивления. В установках электроконтактного нагрева - за счет тепла, выделяющегося при прохождении тока через нагреваемую заготовку, а в установках индукционного нагрева - за счет тепла, выделяющегося в заготовке вследствие действия вихревых токов. Основными видами топлива, используемого в пламенных печах, являются мазут и газ, причем газообразное топливо является наиболее прогрессивным. Жидкое топливо (мазут) сжигают с помощью форсунок, распыляющих топливо и обеспечивающих его хорошее смешивание с воздухом. Для сжигания газа применяют газовые горелки, которые служат для подачи газа и воздуха в печь и смешивания их в необходимых пропорциях.

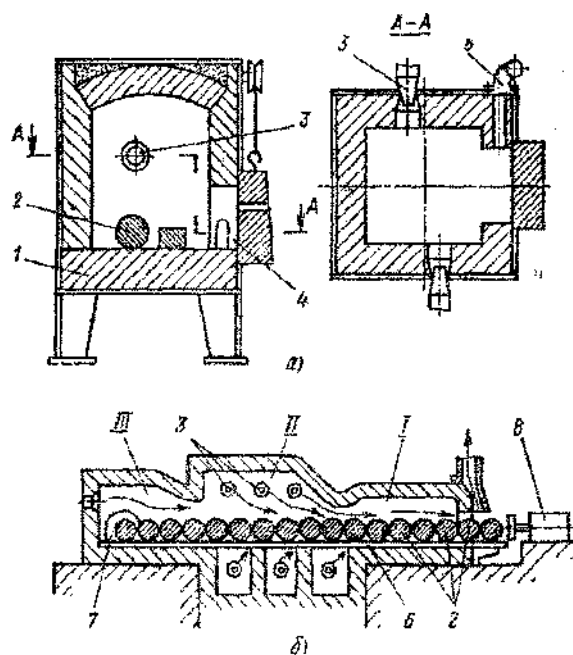


Рис. 3.32 Нагревательные печи: а - камерная; б – методическая

Нагревательные печи бывают двух основных типов: камерные и методические.

Камерная печь. В печи (рис. 3.32, а) заготовки 2 укладывают на поду 1 разогретой до температуры посадки печи и после их прогрева до заданной температуры извлекают, как правило, через окно 4, через которое их загружали в печь. Рабочее пространство печи нагревается за счет сжигания топлива с помощью форсунок или горелок 3. Продукты сгорания отводятся через дымоход 5.

Методическая печь (рис. 3.32, б). Рабочее пространство печи имеет несколько зон с различной температурой. Заготовки 2 проталкиваются с помощью толкателя 8 и, перемещаясь по поду печи 6, попадают сначала в первую подогревательную зону I ($600 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), затем в зону максимального нагрева II ($1250 - 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$), где установлены горелки 3. Зона III является зоной выдержки, в которой происходит выравнивание температуры по сечению заготовки. Горячие газы движутся навстречу перемещающимся заготовкам, которые выдаются из печи через окно 7. Существенным недостатком нагрева в пламенных печах с обычной атмосферой является обезуглероживание поверхности стальных заготовок и высокий угар металла, что связано с большими потерями металла (до 3 - 4 % от общей массы нагреваемого металла за один цикл нагрева). Для уменьшения потерь металла применяют защитные атмосферы.

Электронечи сопротивления. Конструктивно они такие же, как и пламенные, но в качестве нагревателей используют металлические или карборундовые (силитовые) элементы сопротивления, подключающиеся к силовой электрической сети. Сопротивления, нагреваясь, излучают теплоту, которая передается стенкам печи и заготовкам, находящимся на поду. Явным преимуществом таких печей является возможность точного регулирования температуры рабочего пространства. Однако при температурах, необходимых для

нагрева стали, стойкость элементов сопротивления низка. Поэтому используют их в основном для нагрева под обработку давлением цветных сплавов.

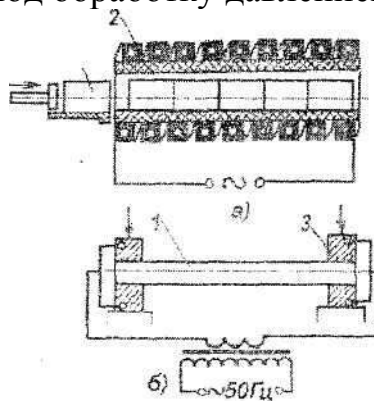


Рис. 3.33. Схемы электронагревательных устройств:
а - индукционного; б - контактного

Индукционное электронагревательное устройство (рис. 3.33, а). Заготовку 1 помещают внутрь многослойного соленоида (индуктора) 2, выполненного из медной трубки. По индуктору пропускают переменный ток, и в заготовке, оказывающейся в переменном электромагнитном поле, возникают вихревые токи, под действием которых и происходит разогрев заготовки.

Преимущества индукционного нагрева: высокая скорость, в несколько раз превышающая скорость нагрева в печах; почти полное отсутствие окалины и обезуглероживания; возможность повышения температуры начала ОМД без появления перегрева; удобство автоматизации подачи и выдачи заготовок; улучшение условий труда.

К недостаткам следует отнести: меньшую универсальность, т. к. для заготовок разных размеров нужно применять разные индукторы; высокую стоимость электроустановок и электроэнергии. Поэтому индукционный нагрев применяют в цехах крупносерийного производства поковок.

Устройство электроконтактного нагрева (рис. 3.33, б). В устройствах концы заготовки 1 зажимают между медными контактами 3, к которым подводится ток большой силы. При прохождении тока через заготовку в ней, из-за ее электрического сопротивления, выделяется теплота, пропорциональная квадрату силы тока. Контактный нагрев обладает теми же достоинствами, что и индукционный.

3.3.2. Прокатка

Прокатка - вид обработки металлов давлением, при котором металл пластически деформируется между вращающимися валками. При этом силы трения $P_{тр}$ между валками и заготовкой втягивают ее в межвалковый зазор, а нормальные силы, перпендикулярные к поверхности валков, производят деформирование заготовки (рис. 3.34).

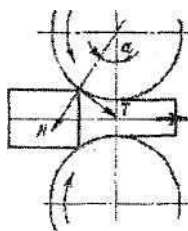


Рис. 3.34. Схема действия сил в момент захвата металла валками

В процессе прокатки уменьшается толщина заготовки при одновременном увеличении ее длины и ширины. Отношение полученной длины l к первоначальной длине l_0 (равное отношению исходной площади поперечного сечения F_0 к полученной площади F) называется *коэффициентом вытяжки* μ :

$$\mu = l/l_0 = F_0/F.$$

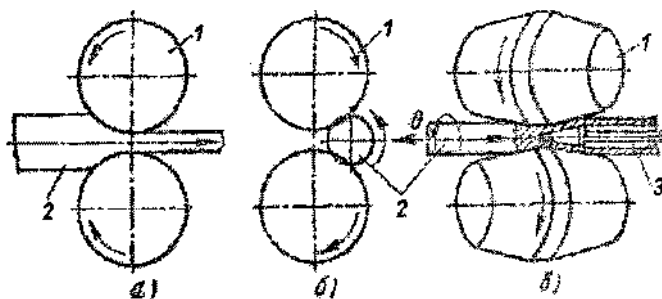


Рис. 3.35. Схемы прокатки: 1 - валки; 2 - заготовка; 3 - оправка

Абсолютное обжатие равно разности толщин заготовки до (H) и после (h) прокатки: $H - h$. *Относительное обжатие* в процентах определяется:

$$\varepsilon = (H-h)/H100\%.$$

Эти величины (μ , ε) являются основными количественными характеристиками деформации при прокатке. Коэффициент вытяжки при прокатке обычно составляет 1,1-2,0 за проход. Выделяют три основных вида прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую (косую).

При **продольной прокатке** (рис. 3.35, а) заготовка 2 деформируется между двумя валками 1, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно осям валков.

При **поперечной прокатке** (рис.3.35, б) валки 1, вращаясь в одном направлении, придают вращение заготовке 2, которая, перемещаясь вдоль оси валков, деформируется.

При **поперечно-винтовой прокатке** (рис. 3.35, в) валки 1 расположены под углом и сообщают заготовке 2 при деформировании вращательное и поступательное движения. Валки вращаются в одну сторону.

3.2.3. Производство сортового проката

Исходные заготовки для сортовых станов - блюмы - последовательно пропускают через ряд калибров. В зависимости от стадии процесса прокатки различают *калибры обжимные* (уменьшающие сечение заготовки), *черновые* (приближающие сечение заготовки к заданному профилю) и *чистовые* (дающие окончательный профиль). В качестве примера на рис. 3.36 показана система из 9 калибров для получения рельсов. После прокатки прутки разрезают на мерные заготовки и правят в холодном состоянии.

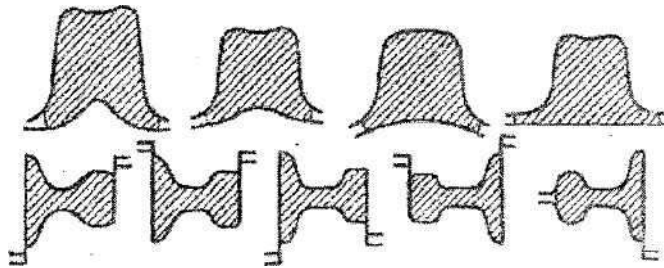


Рис. 3.36. Схема калибров при прокатке рельсов

Производство листового проката

Исходную заготовку - слэб - прокатывают (после второго нагрева) в *толстый лист* большей частью на станах с двумя рабочими клетями

(черновой и чистовой), расположенными друг за другом. Перед черновой клетью сбивают окалину. Чистовая клеть кварто имеет рабочие валки меньшего диаметра, чем черновая. После прокатки листы правят и обрезают на заданные размеры.

Тонкие листы прокатывают в горячем и холодном состояниях. Горячую прокатку ведут на непрерывных многоклетевых станах, имеющих 2 группы клетей (черновую и чистовую). Перед каждой группой в окатиноломателях очищают листы от окалины. Выходящий из чистовых клетей лист сматывается в рулон. Далее листы в рулонах передаются на отделочные операции (правку, разрезку и др.) или на дальнейшую холодную прокатку. С уменьшением толщины листов до определенной величины горячая прокатка сопровождается быстрым остыванием металла, растет сопротивление деформации и увеличиваются отходы металла в окалину из-за неизбежных частых подогревов. Поэтому листы тоньше 2 мм в горячем состоянии прокатывать сложно, и такие листы, как правило, получают холодной прокаткой, которая обеспечивает лучшее качество их поверхности и большую точность по толщине. Холоднокатаный лист катают из горячекатаного. Предварительно горячекатаный лист очищают от окалины травлением в кислотах и промывают. Прокатывают на непрерывных станах кварто и на многовалковых станах с применением смазки. Для снятия наклепа проводят промежуточный отжиг в печах с защитной атмосферой, после чего направляют на дальнейшую прокатку или на *дрессировку* (холодная

прокатка с небольшим обжатием 0,5-5 % за один проход без смазки). В результате дрессировки повышается прочность, улучшается штампуемость и качество поверхности. Далее проводят отделочные операции: обрезка кромок, разрезка на мерные листы, нанесение антикоррозионных покрытий (цинк, олово, алюминий, пластмасса, лак), полирование и др.

Производство труб

Бесшовные трубы. При прокатке бесшовных труб первой операцией является *прошивка* - образование отверстия в круглой заготовке. Прошивку выполняют в горячем состоянии на прошивных станах (схема поперечно-винтовой прокатки, рис. 3.35, в) двумя бочкообразными валками, оси которых расположены под углом ($4 - 14^\circ$) друг к другу. Валки вращаются в одном и том же направлении. В результате этого заготовка 2 получает одновременно вращательное и поступательное движение. В зоне деформации заготовки преобладают радиальные растягивающие напряжения, что приводит к разрыхлению центральной части заготовки, образованию полости и облегчает прошивку отверстия оправкой 3, устанавливаемой на пути движения заготовки. Вторую операцию - последующую *прокатку полученной гильзы в трубу* нужных диаметра и толщины стенки - производят на раскатных станах (схема продольной прокатки). Гильзу раскатывают между двумя валками 1 с последовательно расположенными круглыми калибрами и оправкой 2 (рис. 3.37). Оправку закрепляют на длинном стержне так, чтобы зазор между оправкой и калибром валка определял толщину стенки трубы. Перед прокаткой в следующем калибре трубу поворачивают на 90° . Бесшовные трубы по механическим, физическим, эксплуатационным свойствам превосходят литые и сварные, но значительно дороже.

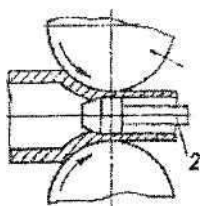
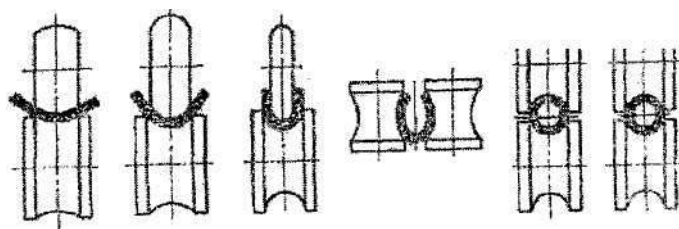


Рис. 3.37. Схема прокатки труб на автоматическом стане

Сварные трубы. Сварные трубы получают из плоской заготовки - ленты, называемой *штрипсом*, по следующей технологии: ленту сворачивают в трубу в формовочном непрерывном стане дуо с числом клеток от 5 до 12 (рис. 3.38). При выходе из последней клетки стана трубная заготовка поступает в электросварочной агрегат, где кромки трубы прижимаются друг к другу роликовыми электродами и свариваются. Далее трубу правят, калибруют, разрезают на мерные куски, производят другие отделочные операции. Кроме электросварки сопротивлением, применяют печную сварку, автоматическую электродуговую под флюсом, индукционную.



3.38. Последовательность процесса свертывания полосы в трубу в шести клетях непрерывного стана

Производство проволоки

Проволочные станы бывают полунепрерывные и непрерывные и предназначены для прокатки проволоки-катанки диаметром 5-10 мм. Проволоку меньшего диаметра получают волочением.

Производство специальных видов проката

К специальным видам прокатки относят прокатку профилей периодического сечения, колес, шаров, колец и др. Периодические профили изготавливают, в основном, поперечной и поперечно-винтовой прокаткой. На рис. 3.39. показана схема стана поперечной прокатки.

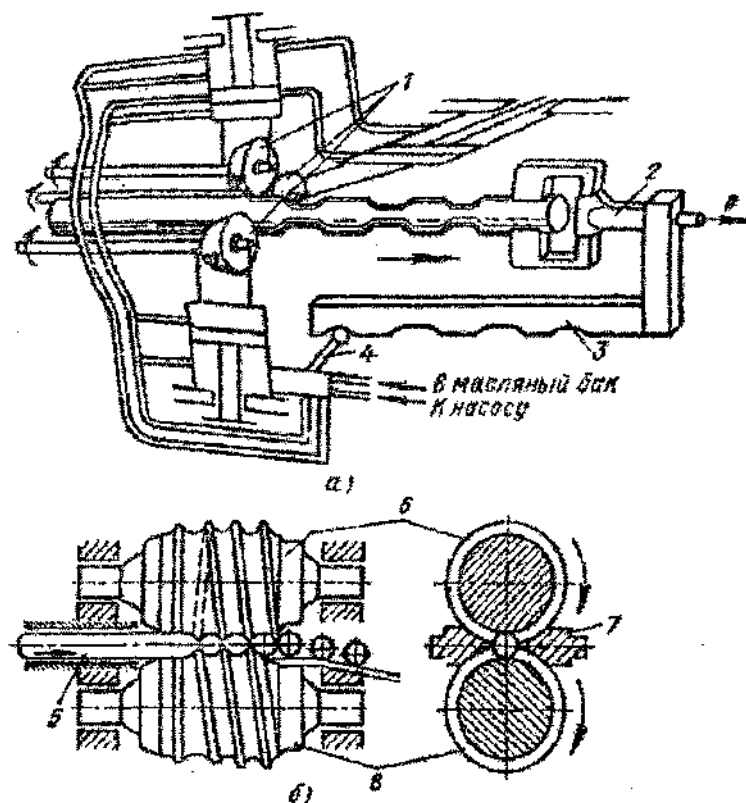


Рис. 3.39. Схемы прокатки периодических профилей в трехвалковом стане поперечной прокатки (а) и в стане поперечно-винтовой прокатки (б)

Щуп 4 скользит по копировальной линейке 3, жестко связанной с кареткой 2 натяжного устройства. В зависимости от профиля копировальной линейки 3 рабочие валки 1 по мере ее движения сближаются или расходятся, изменяя соответственно диаметр прокатываемого профиля. Периодические профили применяют, как фасонные заготовки для последующей штамповки и как заготовку под окончательную механическую обработку (полуоси автомобилей, ступенчатые валы и др.).

На рис. 3.39, б дана схема стана поперечно-винтовой прокатки. Здесь валки 6 и 8 вращаются в одну и ту же сторону. Ручьи валков соответствующей формы сделаны по винтовой линии. Заготовка 5 при прокатке получает вращательное и поступательное движение; от вылета из валков она предохраняется центрирующими упорами 7. Такие станы используют для прокатки заготовок шаров и сферических роликов подшипников качения.

На рис. 3.40 показана последовательность изготовления железнодорожного колеса.

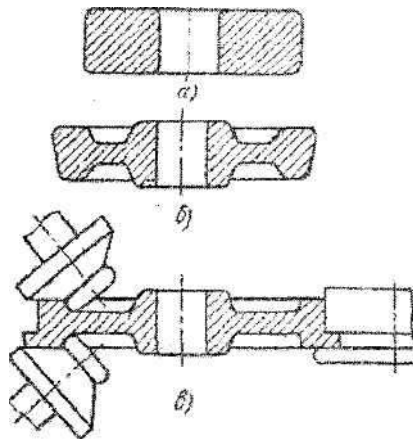


Рис. 3.40. Последовательность изготовления - железнодорожного колеса

Исходной заготовкой являются слитки или прокат круглого сечения. После нагрева заготовку осаживают на гидравлическом прессе и прошивают отверстие (рис. 3.40, а); затем на более мощном прессе формируют в штампе ступицу, диск и контур обода (рис. 3.40, б). Полученная заготовка поступает на колесопрокатный стан, где раскатывают диск, прилегающий к ободу, раскатывают обод и окончательно оформляют гребень на ободу колеса (рис. 3.40, в).

Производство гнутых профилей

Горячей прокаткой фасонных профилей невозможно получить стенки с толщиной менее 2 - 3 мм. Фасонные тонкостенные профили, легкие, но жесткие, сложной конфигурации и большой длины, можно получить методом холодной гибки листового материала на специальных гибочных роликовых станах. Станы имеют 6 - 20 последовательно расположенных клеток непрерывного типа. В каждой паре гибочных роликов меняется форма листовой заготовки, по-

степенно приобретая к последней клети заданную форму (рис. 3.41).

Площадь сечения не меняется. Толщина заготовок из листовой стали или цветных металлов 0,3 - 20 мм, а максимальная ширина 600 - 2500 мм.

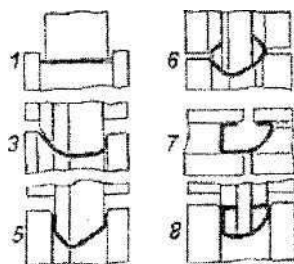


Рис. 3.41. Последовательность профилирования на профилегибочном стане

При одних и тех же прочностных свойствах гнутые профили на 25-40 % легче горячекатаных фасонных профилей, что обуславливает их широкое применение в автомобильной и авиационной промышленности, в машиностроении и строительстве (рис. 3.42).

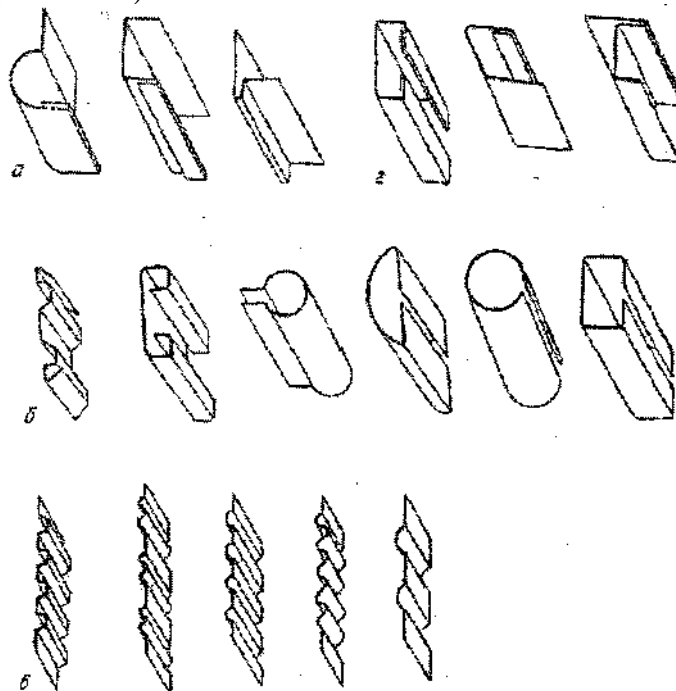


Рис. 3.42. Основные виды гнутых профилей: а, г - профили с элементом двойной толщины; б - профили замкнутого типа; в - гофрированные профили

3.3.3. Ковка

Ковка - вид горячей обработки металлов давлением, при котором металл деформируется ударами универсального инструмента - *бойков*. Ковкой получают заготовки для последующей механической обработки. Эти заготовки называют *поковками*. Ковка применяется в индивидуальном и мелкосерийном производстве и разделяется на ручную и машинную. Ручной ковкой получают

мелкие поковки в единичном производстве и при ремонтных работах с помощью наковальни и кувалды. Машиннаяковка осуществляется на молотах и прессах и является пока единственным способом изготовления тяжелых поковок из слитков весом до 350 тонн. *Молотами* называются машины ударного действия.

Продолжительность деформации на них составляет тысячные доли секунды. Для привода молотов используют пар, сжатый воздух или газ, жидкость под давлением, горючую смесь, взрывчатые вещества, магнитные и гравитационные поля. Основными типами молотов дляковки являются пневматические и паровоздушные.

Паровоздушные молоты приводятся в действие соответственно паром или сжатым воздухом, подающимся от котлов или компрессоров. Поступая в рабочий цилиндр, энергоноситель разгоняет поршень и связанные с ним подвижные части молота до скорости 6 - 7 м/с. *Пневматические молоты* используют сжатый воздух, но воздух является пружиной, связывающей два поршня: рабочий и компрессорный. Компрессорный приводится от коленчатого вала двигателя. Компрессор встроен в молот. Характеристикой мощности молота является *вес падающих частей* (суммарный вес всех частей молота, перемещающихся в его верхней части). Чем больше вес падающих частей, тем выше энергия удара верхнего бойка по заготовке. Пневматические молоты изготавливаются с весом падающих частей от 50 кг до 1000 кг, а паровоздушные - от 1000 кг до 8000 кг.

Гидравлические прессы. Прессы развивают статическое усилие, и продолжительность деформации у них может составлять десятки секунд. В гидравлическом прессе усилие создается с помощью жидкости (водной эмульсии или минерального масла) высокого давления (200-500 ат.), подаваемой в рабочий цилиндр. Характеристикой мощности пресса является *усилие*, развиваемое им и передаваемое заготовке. Дляковки используются гидравлические прессы с усилием от 300 т до 15000 т. Прессы используют дляковки очень крупных, тяжелых изделий -слитков весом до 350 т. На практике при выборе мощности необходимого оборудования для свободнойковки пользуются специальными справочниками, таблицами, формулами.

Операцииковки

Процессковки состоит из чередования в определенной последовательности основных и вспомогательных операций. К основным операциям относятся: осадка, протяжка, прошивка, отрубка, гибка, скручивание.

Осадка - операция, при которой высота заготовки уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается (рис. 3.43, а). Разновидностью осадки является *высадка* (рис. 3.43, б), при которой металл осаживается только на части длины заготовки.

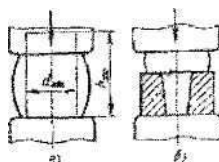


Рис. 3.43. Схемы осадки (а) и высадки (б)

Протяжки - операция удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 3.44, а). Протяжкой получают поковки с удлиненной осью - валы, рычаги, тяги и т. п. Разновидностями протяжки являются: *разгонка* - операция увеличения ширины части заготовки за счет уменьшения ее толщины (рис. 3.44, б), *протяжка с оправкой* - операция увеличения длины пустотелой заготовки за счет уменьшения толщины ее стенок (рис. 3.44, в).

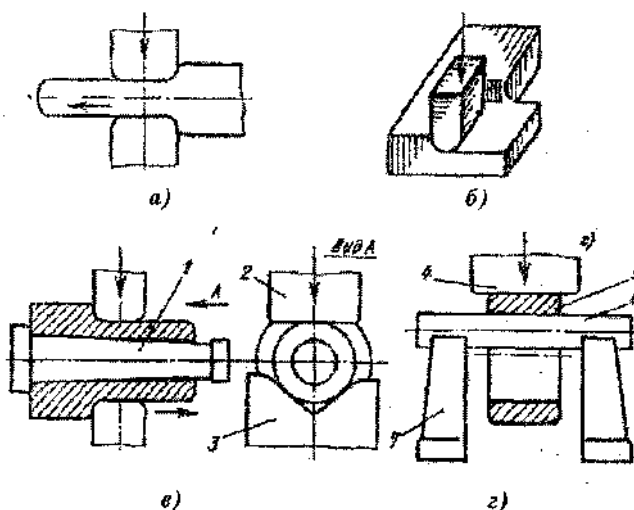


Рис. 3.44. Схема протяжки и ее разновидностей

Раскатка на оправке - операция одновременного увеличения наружного и внутреннего диаметров кольцевой заготовки за счет уменьшения толщины ее стенок (рис. 3.44, г). Заготовка 5 опирается внутренней поверхностью на цилиндрическую оправку 6, устанавливаемую концами на подставках 7, и деформируется между оправкой и бойком 4.

Прошивка - операция получения полостей в заготовке за счет вытеснения металла (рис. 3.45, а). Прошивкой можно получить сквозное отверстие или углубление (глухая прошивка). Инструментом для прошивки являются *прошивки* (рис. 3.45, в), сплошные и пустотелые; последними прошивают отверстия большого диаметра (400 - 900 мм). При сквозной прошивке тонких поковок применяют *подкладные кольца* (рис. 3.45, б). Более толстые поковки прошиваются с двух сторон без подкладного кольца (рис. 3.45, а).

Отрубка - операция, при которой заготовки разделяют или только подразделяют (*надрубка*) на части путем внедрения деформирующего инструмента - *топора* (рис. 3.24, г). Отрубку применяют для получения мерных заготовок, для удаления излишков металла на концах поковок или при удалении донной и прибыльной частей слитка, а также при ковке фигурных поковок.

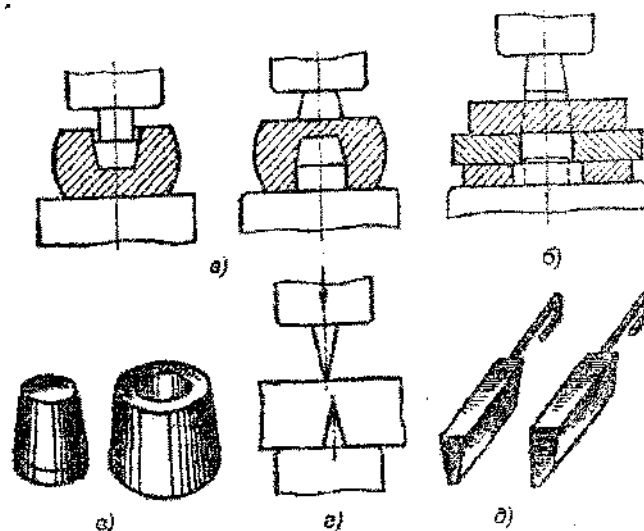


Рис. 3.45. Схемы прошивки и отрубки:
 а - двусторонняя; б - односторонняя с подкладным кольцом;
 в - прошивки; г - отрубка; д - топоры

Гибка - операция придания заготовке изогнутой формы по заданному контуру (рис. 3.46, а). Этой операцией получают угольники, скобы, крючки, кронштейны и т. п.

Скручивание - операция, при которой часть заготовки поворачивается вокруг продольной оси (рис. 3.46, б). При скручивании одну часть заготовки зажимают между бойками, другую разворачивают с помощью приспособлений - воротков, ключей, лебедок, вилок. Скручивание применяют при изготовлении коленчатых валов, сверл и т. п.

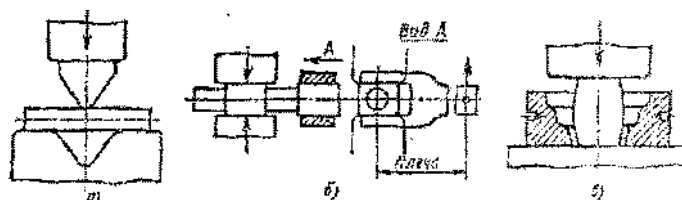


Рис. 3.46. Схемы: а - гибки; б - скручивания; в - штамповки в подкладном штампе

Кузнечная сварка - операция, посредством которой с помощью местного нагрева и механического воздействия соединяют в одно целое части или концы свариваемой поковки. Хорошо сваривается сталь, содержащая до 0,3 % углерода. Способы сварки - внахлестку, вразруб. Сварка производится при температуре 1300 - 1400 °С ударами, наносимыми по свариваемым заготовкам в быстром темпе, в один прием. Для получения качественного соединения при нагреве заготовок применяют флюсы. Кроме рассмотренных основных операций свободнойковки могут использоваться и другие. Реальный технологический процесс изготовления поковок представляет собой последовательное осуществление нескольких операций.

Величина деформации при ковке характеризуется коэффициентом уковки K_y :

$$K_y = F_1/F_2$$

где F_1 и F_2 - большая и меньшая площади поперечного сечения до и послековки. При ковке заготовок из проката чаще всего коэффициент уковки бывает 1,3-1,5, а при ковке слитков $K_y = 3-10$. Чем больше K_y слитков, тем лучше структура металла и выше его механические свойства.

Особенности конструирования деталей, изготавливаемых свободной ковкой

Поковки должны быть наиболее простыми, очерченными цилиндрическими поверхностями и плоскостями (рис. 3.47, 1-4). Следует избегать в поковках конических и клиновых форм (рис. 3.47, 5-6). Надо учитывать трудность выполнения ковкой участков пересечений цилиндрических поверхностей между собой и с призматическими поверхностями (рис. 3.47, 7-8). В поковках необходимо избегать ребристых сечений, выступов, бобышек и т. п. В местах сложной конфигурации приходится прибегать к напускам в целях упрощения очертаний поковки. Следует стремиться, чтобы форма детали позволяла получить при ковке наиболее благоприятное расположение волокон. Чертеж поковки составляют на основании разработанного конструктором чертежа готовой детали с учетом припусков, допусков и напусков.

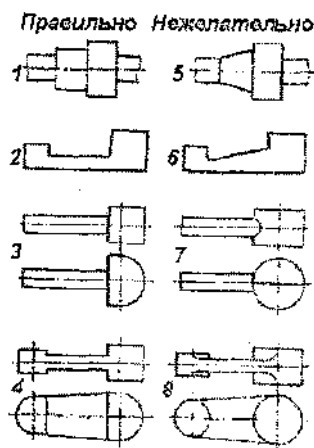


Рис. 3.47. Правильные и нежелательные формы поковок

Припуск - поверхностный слой металла в поковке, подлежащий удалению механической обработкой для получения требуемых размеров и качества поверхности детали (рис. 3.48, а).

Допуск - допустимое отклонение от номинального размера поковки, т. е. точность, с которой должна быть изготовлена поковка (рис. 3.48, а). Если припуски предусматривают только в местах, подлежащих обработке резанием, то

допуски - на все размеры поковки.

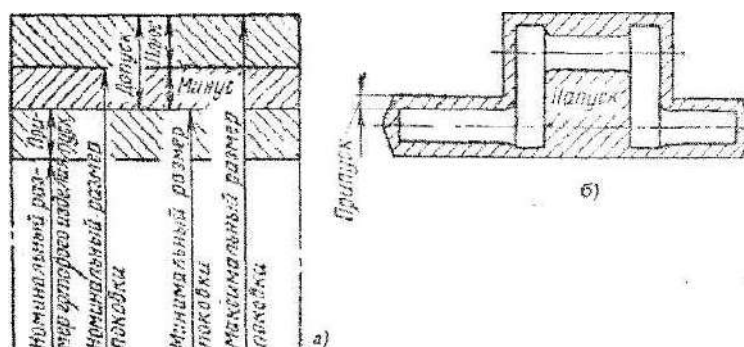


Рис. 3.48. Схема размеров поковки

Иногда конфигурацию поковки упрощают за счет *напусков* - объема металла, добавляемого к поковке сверх припуска для упрощения ее формы и, следовательно, процессаковки (рис. 3.48, б). Напуски удаляют последующей механической обработкой. Припуски, допуски и напуски назначают в соответствии с ГОСТом.

Механизацияковки

Для снижения трудоемкости и повышения производительности, а также для улучшения условий труда при ковке стремятся максимально механизировать этот процесс. Для посадки заготовок (слитков) в печь и выдачи их из печи кроме мостовых и консольно-поворотных кранов, применяют специальные посадочные машины напольного или подвесного типов. Ковку на прессах и молотах можно механизировать с помощью различных кранов, кантователей и манипуляторов.

Технико-экономические характеристикиковки и область ее применения

К основным **преимуществам** свободнойковки относятся:

1. Получение металла с более высокими механическими свойствами по сравнению с отливками.
2. Возможность получать крупные поковки по массе (до 350 т) и габаритам, что другими способами недостижимо.
3. Для изготовления крупных поковок требуются сравнительно небольшие усилия, т. к. обработка осуществляется обжатием отдельных небольших участков, и металл относительно свободно течет в стороны.
4. Применение универсального оборудования и инструмента резко снижает затраты производства, особенно мелкосерийного.

К **недостаткам** свободнойковки относятся:

1. Низкая производительность по сравнению с горячей штамповкой.

Этот недостаток стремятся устранить путем максимальной механизации процесса.

2. Большие напуски на поковках, что требует большого объема последующей обработки. Большие допуски и припуски, особенно на крупных поковках.

Обе эти причины вызывают повышение отходов металла в стружку. Таким образом, свободную ковку целесообразно применять в единичном и мелко-серийном производстве, а также при изготовлении крупногабаритных заготовок.

3.3.4. Штамповка

Штамповка - способ изготовления изделий давлением с помощью специального инструмента (*штампа*), рабочая полость которого определяет конфигурацию конечной *штампованной поковки* (изделия). По сравнению с ковкой штамповка имеет ряд преимуществ:

1. Можно получать поковки сложной конфигурации без напусков. При этом допуски на штампованную поковку в 3-4 раза меньше, чем на кованую. Следовательно, значительно сокращается отход металла в стружку при последующей обработке резанием.

2. Производительность штамповки значительно выше - десятки и сотни поковок в час.

К недостаткам относятся:

1. Дорогостоящий штамповый инструмент - штамп - используется для изготовления только одной, конкретной поковки.

2. Для штамповки требуются гораздо большие усилия деформирования, чем дляковки таких же поковок.

Следовательно, штамповка экономически целесообразна при серийном производстве поковок массой до 20 - 30 кг.

Процессы штамповки разделяют на *объемную* и *листовую штамповку*.

Объемную штамповку подразделяют на *горячую* и *холодную*.

Горячая объемная штамповка

Сущность процесса *горячей объемной штамповки* заключается в том, что нагретая до оптимальной температуры заготовка ($T_{\text{нагр.}} > T_{\text{рекр.}}$) помещается в полость одной из половин штампа, где она при воздействии второй половины приобретает заданную форму.

Полость внутри штампа называют *ручьем*. В качестве заготовок для горячей штамповки используют прокат круглого, квадратного, прямоугольного профилей, реже - периодический прокат. Горячей объемной штамповкой получают заготовки сложной конфигурации (шестерни, коленчатые валы, кронштейны, рычаги и др.) для деталей автомобилей, тракторов, самолетов, железнодорожных вагонов, станков и т. д. (рис. 3.49).

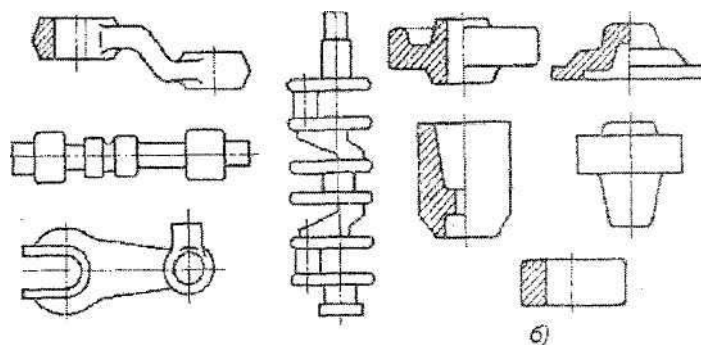


Рис. 3.49. Штампованные поковки

Штамповка в открытых и закрытых штампах

В зависимости от типа штампа различают *штамповку в открытых штампах* и в *закрытых*. *Открытыми штампами* называют такие, у которых вокруг всего контура ручья имеется специальная *облойная канавка* 1, соединенная тонкой щелью 1 с полостью штампа (рис. 3.29, а). Избыток металла при штамповке вытесняется в *облой* (заусенец), что позволяет не предъявлять особо высоких требований к точности заготовок по объему. Заусенец затем обрезается в специальных штампах. 7,

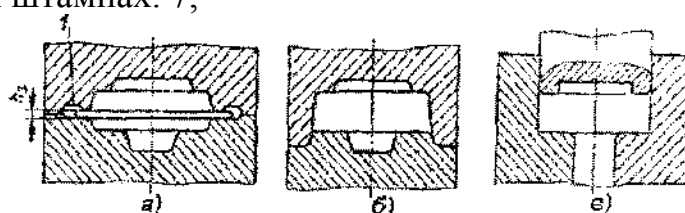


Рис. 3.50. Схемы штамповки в открытых и закрытых штампах: 1 - облойная канавка

Штамповка в *закрытых штампах* (рис. 3.50, б) осуществляется без облоя. В этом случае необходимо строго соблюдать равенство объемов заготовки и поковки, т. е. отрезка заготовок должна проводиться с высокой точностью. Преимуществом штамповки в закрытых штампах является уменьшение расхода металла, т. к. нет отхода в заусенец.

Особенности конструирования деталей, изготавливаемых объемной штамповкой

Чертеж поковки разрабатывают по чертежу детали. При получении поковок в открытых штампах вначале выбирается поверхность разъема штампа, т.е. поверхность, по которой соприкасаются нижняя и верхняя половины штампа. Ее выбирают так, чтобы поковка легко извлекалась из полости штампа. Глубина полостей в половинах штампа должна быть минимальной и примерно одинаковой (рис. 3.51). Затем назначают напуски, припуски на механическую обработку и допуски на размеры.

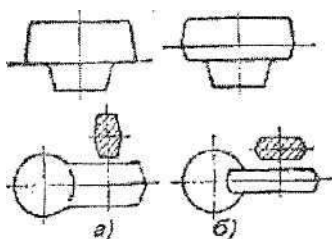


Рис. 3.51. Выбор плоскости разъема штампа: а - неправильно; б – правильно

Для свободного извлечения поковки из штампа назначают *штамповочные уклоны* ($3 - 10^\circ$). Все пересекающиеся поверхности поковки сопрягаются по радиусам (наружные радиусы 1 - 6 мм, внутренние - в 3 - 4 раза больше). Затем назначают припуск на усадку (при охлаждении объем металла уменьшается). После всего этого по чертежу поковки выполняют чертеж штампа, на котором предусматривают облойную канавку. Чертеж поковки при штамповке в закрытых штампах с одной плоскостью разъема составляют так же, но плоскость разъема выбирают по наибольшей торцевой поверхности детали.

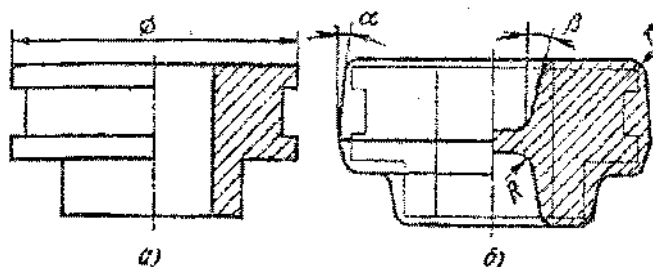


Рис. 3.52. Пример составления чертежа поковки: а - деталь; б – поковка

Получение штампованных поковок

Поковки простой конфигурации штампуют в штампах с одной полостью, т. е. *одноручьевых*. Поковки сложной формы с резкими изменениями сечений по длине, с изогнутой осью получить в одноручьевом штампе невозможно, поэтому применяют *мноручьевые штампы* с заготовительными и штамповочными ручьями (рис. 3.53) или одноручьевые *заготовительные* и *чистовые штампы*, установленные на отдельных штамповочных машинах. К *заготовительным ручьям*, служащим для получения фасонной заготовки, относятся: протяжной, подкатной, пережимной, формовочный, гибочный, площадка для осадки, отрубной нож. К *штамповочным ручьям* относятся черновой и окончательный чистовой ручей, в котором получают готовую поковку.

Технологический процесс горячей объемной штамповки:

1. Раскрой проката на мерные заготовки.
2. Нагрев заготовок.
3. Штамповка.
4. Отделочные операции:
 - а) обрезка облоя, пробивка пленок;
 - б) термообработка - при необходимости;

- в) правка - устранение короблений, искривлений и т. п.;
- г) очистка от окалины (в галтовочных барабанах, дробеструйных камерах, травление в кислотах);
- д) контроль размеров и чистоты поверхности.

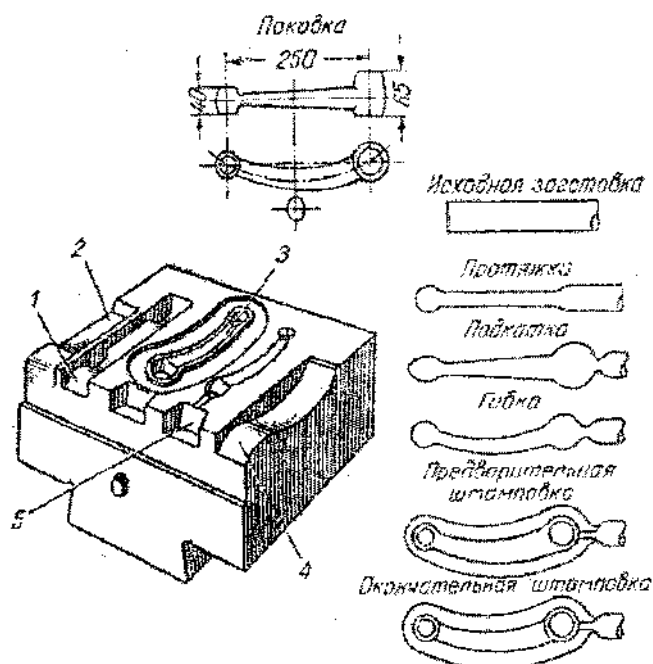


Рис. 3.53. Многооручьевого молотовой штамп

Оборудование для объемной штамповки

Для горячей объемной штамповки применяют молоты, кривошипные горячештамповочные прессы, горизонтально-ковочные машины, гидравлические прессы, винтовые прессы и машины для специализированных процессов штамповки.

Основным видом штамповочных молотов являются *паровоздушные штамповочные молоты*. Принцип действия их аналогичен ковочным паровоздушным молотам, но конструкция другая. У них стойки станины крепятся непосредственно к шаботу; имеют усиленные регулируемые направляющие для движения бабы. Масса шабота в 20-30 раз больше массы падающих частей. Эти особенности обеспечивают необходимую точность соударения штампов.

Кривошипные горячештамповочные прессы (рис. 3.54). Электродвигатель 4 передает движение клиновыми ремнями на шкив 3, сидящий на валу 5, на другом конце которого закреплено малое зубчатое колесо 6. Это колесо находится в зацеплении с большим зубчатым колесом 7, свободно вращающимся на кривошипном вале 9.

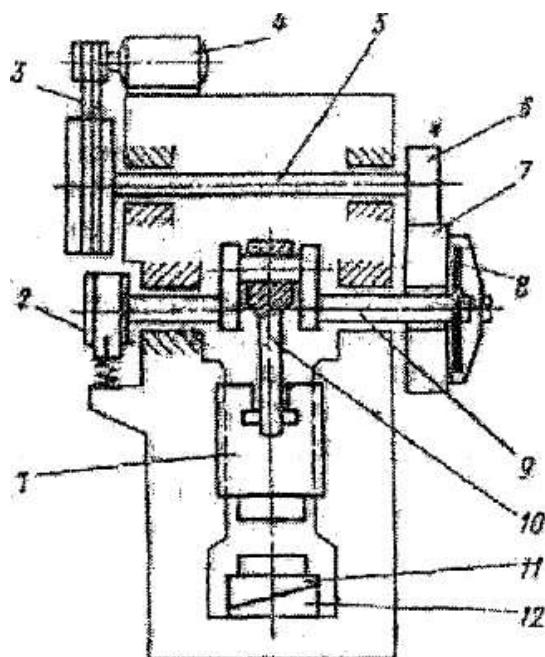


Рис. 3.54. Кинематическая схема кривошипного горячештамповочного пресса

При помощи пневматической фрикционной дисковой муфты 8 зубчатое колесо 7 может быть сцеплено с кривошипным валом 9, чтобы привести его во вращение. Посредством шатуна 10 вращение кривошипного вала преобразуется в возвратно-поступательное движение ползуна 1. Для остановки вращения кривошипного вала служит тормоз 2. Стол пресса 11 может перемещаться клином 12 и таким образом регулировать высоту штамповочного пространства. Для облегчения удаления поковки из штампа прессы имеют выталкиватели в столе и ползуне. Они срабатывают при ходе ползуна вверх. Длина хода ползуна постоянна (равна удвоенному радиусу кривошипа), поэтому в каждом ручье штампуяют за один ход пресса (на молотах до 3 - 5 ударов).

Преимущества:

- производительность штамповки на прессах выше, чем на молотах;
- большая точность поковок по высоте;
- штамповочные уклоны меньше, т. к. есть выталкиватели;
- большие возможности для механизации и автоматизации процесса.

Недостатки:

- стоимость пресса в 3-4 раза выше стоимости молота. *Горизонтально-ковочные машины (ГКМ).* Эти машины имеют штампы, состоящие из трех частей (рис. 3.55): неподвижной матрицы 3, подвижной матрицы 5 и пуансона 1. Пруток 4 с нагретым участком на конце закладывают в неподвижную матрицу 3. Положение прутка определяется упором 2. При включении машины подвижная матрица 5 прижимает пруток к неподвижной матрице, упор 2 автоматически отходит в сторону, и после этого пуансон I деформирует выступающую часть прутка. Металл заполняет формующую полость в матрицах и в пуансоне (если она в нем есть). После деформирования пуансон движется в обратном направлении, матрицы разжимаются и поковку вынимают.

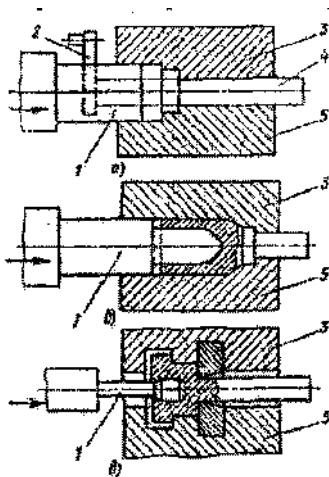


Рис. 3.55. Схема основных операций при штамповке на горизонтально ковочной машине

Кинематическая схема ГKM дана на рис. 3.56. Главный ползун 7, несущий пуансон, приводится в движение от кривошипного вала 6 с помощью шатуна 5.

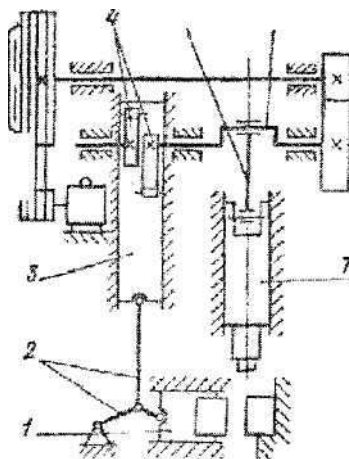


Рис. 3.56. Кинематическая схема горизонтально-ковочной машины

Подвижная щека 1 приводится от бокового ползуна 3 системой рычагов 2; боковой ползун, в свою очередь, - кулачками 4, сидящими на конце кривошипного вала машины.

Основные операции, выполняемые на ГKM: высадка (рис. 3.55, а) прошивка (рис. 3.55, б) и пробивка (рис. 3.55, в).

Получают изделия типа стержня с фланцем, кольца или стакана.

К **преимуществам** штамповки на ГKM можно отнести следующее:

1. Легкость штамповки таких деталей, которые на другом оборудовании рационально изготовить нельзя (поковки типа стержня с фланцем).
2. Т. к. штамп состоит из трех частей, напуски на поковках и штамповочные уклоны малы или отсутствуют.
3. Получение поковок высокой точности.
4. Легкость автоматизации.
5. Безударную, спокойную и безопасную работу.

Недостатки:

1. Меньшая универсальность по сравнению с молотами и прессами; резко ограниченная номенклатура поковок; относительно небольшие размеры и масса поковок (до 150 кг).

2. Низкая стойкость штампов.

3. Необходимость очистки нагретого прутка от окалины.

4. Высокая стоимость (поковки примерно в 1,5 раза дороже, чем полученные на КГШП).

Гидравлические штамповочные прессы. Устройство этих прессов принципиально не отличается от ковочных. Усилие современных гидравлических прессов достигает 750 МН, т. е. они относятся к наиболее мощному штамповочному оборудованию.

На гидравлических прессах штампуют поковки типа дисков, коленчатых валов, различного рода рычагов, кронштейнов; толстостенных сферических днищ, стаканов, крупногабаритных панелей и рам из легких сплавов в самолетостроении. Исходной заготовкой является прокат и полуфабрикатковки.

Холодная объемная штамповка

Выполняется без нагрева, ниже температуры рекристаллизации.

Разновидности:

1. *Холодное выдавливание* - по схеме прессования, т. е. заготовку, отрезанную от прутка (не слиток), помещают в полость, из которой металл может выдавливаться в отверстия, имеющиеся в рабочем инструменте. Различают прямое, обратное, боковое и комбинированное выдавливание.

Холодным выдавливанием получают болты, тарельчатые клапаны, корпуса тубиков, тройники, крестовины и т. п.

2. *Холодная высадка* - по схеме штамповки на ГKM изготавливают гвозди, заклепки, шурупы, винты, болты, шарики, ролики, гайки, звездочки и т. п.

3. *Объемная формовка* - штамповка в открытых штампах, иногда за несколько переходов с промежуточным отжигом.

4. *Чеканка* - получение рельефа путем незначительных деформаций. Изготавливают монеты, медали, значки и т. п.

Холодная листовая штамповка

Холодная листовая штамповка - способ изготовления плоских и пространственных изделий с помощью штампов из листового материала, ленты или полосы. Обычно используют пластичные металлы и сплавы: малоуглеродистые стали, сплавы алюминия, меди, титана, магния и др.

Листовой металл толщиной свыше 15 мм, как правило, штампуют в горячем виде (*горячая листовая штамповка*).

Все операции холодной листовой штамповки разделяют на *разделитель-*

ные, в которых этап пластической деформации всегда завершается разрушением, и *формоизменяющие*, в которых заготовка не должна разрушаться в процессе деформирования.

Разделительные операции

1. *Отрезка* - отделение части заготовки по замкнутому контуру в штампах или на машинах-ножницах.

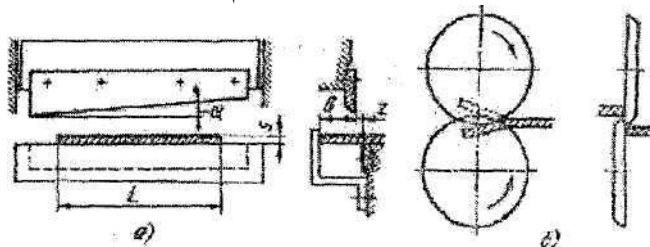


Рис. 3.57. Схемы действия ножниц: а - гильотинных; б - дисковых.

Основные типы ножниц:

а) *Гильотинные* (рис. 3.57, а). Нож соприкасается с заготовкой в одной точке, следовательно, сопротивление срезанию минимально. Длина отрезаемой полосы L не должна превышать длины ножей.

б) *Дисковые* (рис. 3.57, б). Вращение дисковых ножей обеспечивает не только разделение, но и подачу заготовки действием сил трения. Длина отрезаемой полосы не ограничивается инструментом. Прямолинейность реза обеспечивается скольжением разделяемых частей заготовки по поверхностям ножей.

2. *Вырубка* - отделение части заготовки по замкнутому контуру, причем отделяемая часть идет на деталь (изделие), рис. 3.58.

4. *Пробивка* - образование в заготовке отверстия или паза с удалением части металла в отход.

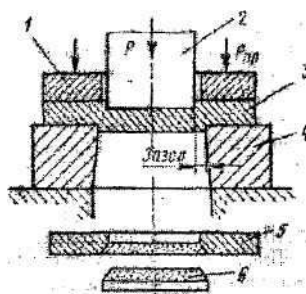


Рис. 3.58. Схема вырубki (пробивки): 1 - прижим; 2 - пуансон; 3 - заготовка; 4 - матрица; 5 - отход (изделие); 6 - изделие (отход)

Вырубку и пробивку и матрицей, соответствуют пуансоном и матрицей конфигурации которых соответствуют конфигурации детали. Пуансон выдавливает часть заготовки в отверстие матрицы.

4. *Надрезка* - отделение части заготовки по незамкнутому контуру.

5. *Обрезка* - отделение краевой части заготовки для получения готового изделия.

Формоизменяющие операции

Это операции, в результате которых изменяется форма заготовки путем пластического деформирования.

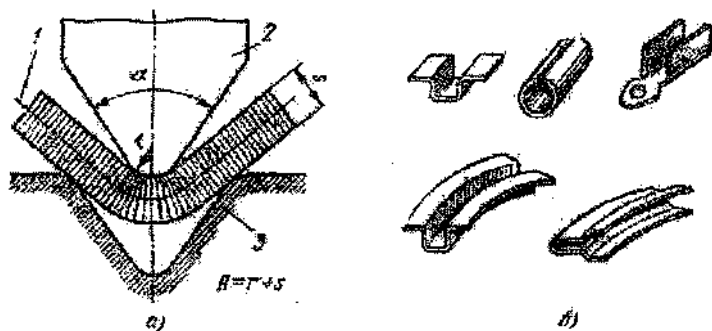


Рис. 3.59. Схема гибки (а) и изделия, получаемые с ее использованием (б):

I - нейтральный слой; 2 - пуансон; 3 - матрица

1. *Гибка* - изменение кривизны заготовки без изменения ее размеров (рис. 3.59).

2. *Вытяжка* - получение полрой заготовки или изделия из плоской заготовки (рис. 3.60).

3. *Протяжка* - вытяжка с утонением стенки (рис. 3.61, б). Исходная заготовка - предварительно вытянутое изделие. Зазор между пуансоном и матрицей меньше толщины стенки, которая, сжимаясь между поверхностями пуансона и матрицы, утоняется и одновременно удлиняется.

4. *Отбортовка* - получение бортов по внутреннему и (или) наружному контуру заготовки (рис. 3.62, а).

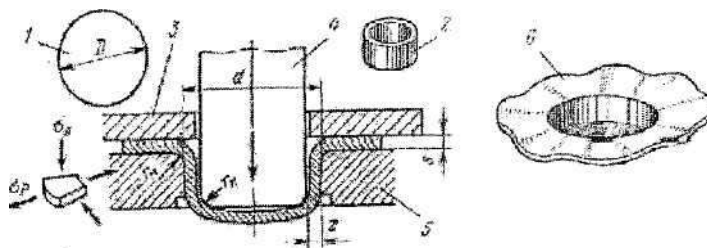


Рис. 3.60. Схема вытяжки: 1 - заготовка; 2 - изделие; 3 - прижим; 4 - пуансон; 5 - матрица; 6 - изделие со складками, образующимися при вытяжке без прижима

5. *Обжим* - уменьшение диаметра части полрой заготовки путем проталкивания ее в сужающийся канал матрицы (рис. 3.62, б).

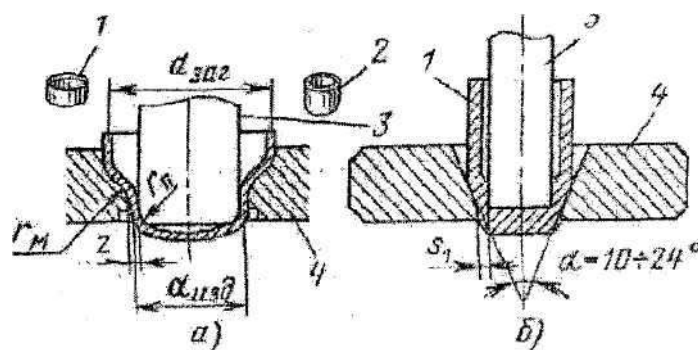


Рис. 3.61. Схемы последующей вытяжки (а) и вытяжки с утонением стенки (б):
1 - заготовка; 2 - изделие; 3 - пуансон; 4 - матрица

6. *Формовка* - получение рельефа незначительной высоты за счет местных деформаций (рис. 3.62, в). Применяется для получения ребер жесткости на плоских поверхностях, нанесения знаков, клейм, надписей и т. п. При деформировании может использоваться металлический пуансон, а также резиновая подушка или жидкость.

Штампы для листовой штамповки

Штампы, применяемые для листовой штамповки, делятся на простые (однооперационные), штампы последовательного действия и штампы совмещенного действия. *Простые штампы* выполняют какую-либо одну операцию листовой штамповки.

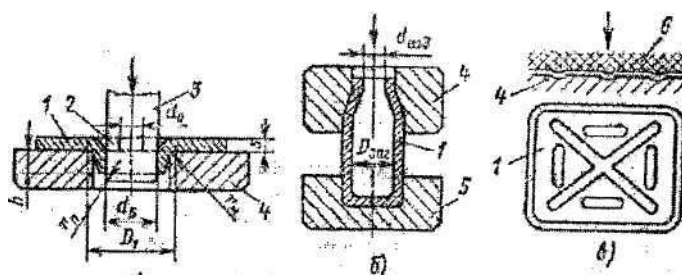


Рис. 3.62. Схемы отбортовки (а), обжима (б) и формовки (в):
1 - изделие; 2 - заготовка; 3 - пуансон; 4 - матрица; 5 - подставка-упор; 6 - резиновая подушка

Штампы последовательного действия за один ход пресса выполняют несколько операций листовой штамповки в различных позициях по направлению подачи, так что для очередной операции заготовка перемещается на шаг подачи. На рис. 3.63. показано, что в позиции I происходит пробивка, а после перемещения полосы на шаг подачи (позиция II) - вырубка, в результате чего получают изделие в виде шайбы.

Штампы совмещенного действия выполняют за один ход ползуна несколько операций, без перемещения заготовки в направлении подачи (рис. 3.64).

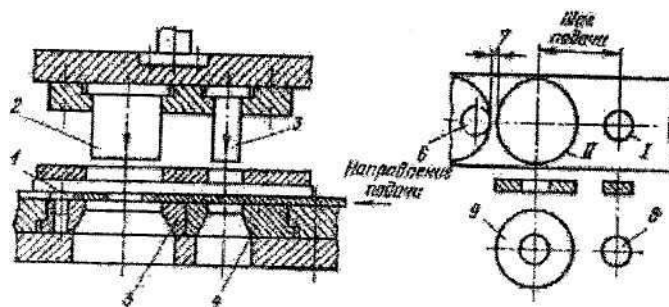


Рис. 3.63. Схема штампа последовательного действия для пробивки и • вырубki: 1 - упор; 2 - пуансон вырубki; 3 - пуансон пробивki; 4 - матрица пробивki; 5 - матрица вырубki; 6 - упор; 7 - перемычка; 8 - отход; 9 - изделие

Основным видом оборудования для листовой штамповки являются кривошипные и гидравлические прессы, а также ножницы. Для повышения производительности прессы оснащают устройствами, механизмирующими подачу заготовки к инструменту и удаление отштампованных деталей из прессы.

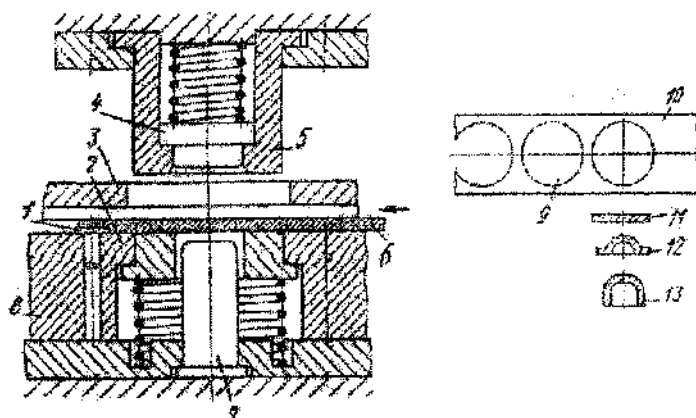


Рис. 3.64. Схема штампа совмещенного действия для вырубki и вытяжки: 1 - упор; 2 - прижим; 3 - съемник; 4 - выталкиватель; 5 - пуансон вырубki и матрица вытяжки; 6 - исходная листовая заготовка; 7 - пуансон вытяжки; 9 - отход; 10 - полоса; 11 -вырубленная заготовка; 12 - начало вытяжки, 13 - изделие

Высокоскоростная штамповка

Основными разновидностями высокоскоростной листовой штамповки являются штамповка взрывом, электрогидравлическая и электромагнитная.

Взрывом штамнуют обычно в бассейне с водой (рис. 3.65). Заряд с детонатором подвешивают в воде над заготовкой, зажатой между матрицей и прижимом.

Полость матрицы под заготовкой вакуумируется, чтобы воздух не препятствовал ее плотному прилеганию к матрице. Взрыв образует ударную волну, которая, достигая заготовки, вызывает ее разгон и деформацию. При штамповке взрывом не требуется дорогого прессового оборудования, конструкция штампа очень проста. *Электрогидравлическую штамповку* также проводят в бассейне с водой. В результате кратковременного электрического разряда в

жидкости возникает ударная волна, которая, дойдя до заготовки, деформирует ее по матрице. Мощный искровой разряд подобен взрыву. Схема электромагнитной штамповки приведена на рис. 3.66.

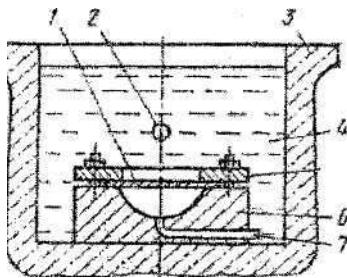


Рис. 3.65. Схема штамповки взрывом деталей из плоской заготовки:
1 - заготовка, 2 - заряд взрывчатого вещества, 3 -бассейн, 4 - передающая среда,
5 - прижимное кольцо, 6 - матрица, 7 -вакуумная система

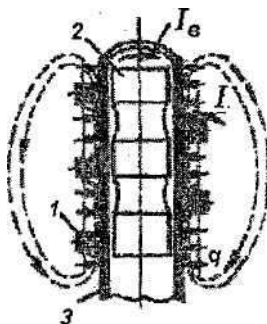


Рис. 3.66. Схема электромагнитной штамповки

Электрическая энергия преобразуется в механическую за счет импульсного разряда батареи конденсаторов через соленоид 1, вокруг которого при этом возникает мгновенное магнитное поле высокой мощности, наводящее вихревые токи I_v в трубчатой токопроводящей заготовке 3. Вихревые токи образуют свое магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем соленоида, отталкивается от него и создает механические силы q , деформирующие заготовку по пуансону 2 или матрице. Для электромагнитной штамповки трубчатых и плоских заготовок созданы установки, на которых производят раздачу, обжим, формовку, пробивку, а также сборочные операции - пластическое деформирование одной детали по контуру другой.

Технико-экономическая характеристика и область применения листовой штамповки

К достоинствам листовой штамповки относятся:

1. Возможность получения деталей минимальной массы при заданной их прочности и жесткости.
2. Достаточно высокие точность размеров и качество поверхности.
3. Сравнительная простота механизации и автоматизации процессов

штамповки, обеспечивающая высокую производительность: 30-40 тыс. деталей в смену с одной машины.

4. Хорошая приспособленность к масштабам производства, при которой листовая штамповка может быть экономически целесообразной и в массовом, и в мелкосерийном производствах. Диапазон размеров штампуемых листовых деталей очень большой: по габаритным размерам - от долей миллиметра (секундная стрелка ручных часов) до 6-7 метров облицовка автомобиля, самолета, ракеты); по толщине - от десятых долей миллиметра до 100 мм и выше.

Листовую штамповку широко применяют в машиностроении, приборостроении, радиотехнической и электронной промышленности. Удельный вес листовой штамповки по расходу материалов в основных отраслях машиностроения и производства товаров народного потребления составляет 60-98 %.

3.3.5. Волочение

Инструмент и оборудование

Процесс *волочения* заключается в протягивании заготовки через постепенно сужающееся отверстие в инструменте, называемом волокой. *Волока* (фильера, матрица) представляет собой кольцо (рис. 3.67, а), рабочее отверстие которого состоит из входной (или смазочной) зоны I, деформирующей зоны II, калибрующего пояска III и выходного конуса IV. Ее изготавливают из инструментальной стали, металлокерамических сплавов, и алмазов (для волочения проволоки диаметром менее 0,2 мм). Волоочильные станы разделяют на два типа: барабанные и цепные.

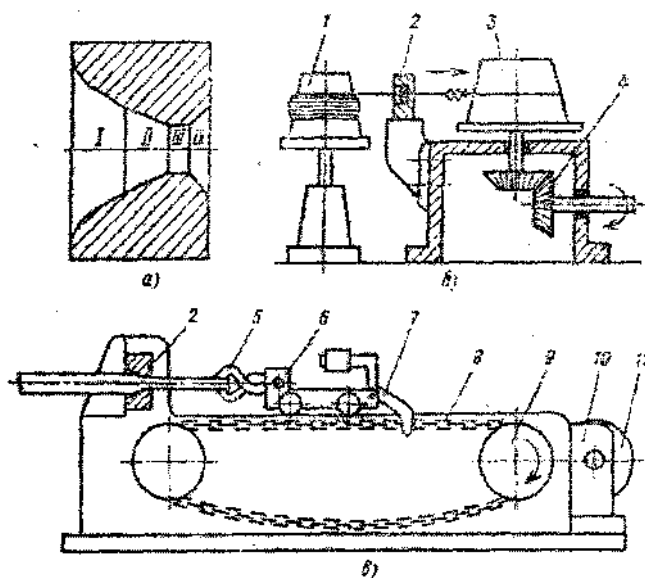


Рис. 3.67. Продольный разрез волоки (а) и схемы барабанного (б) и цепного (в) волоочильных станков

Барабанные станы (рис. 3.67, б) служат для волочения проволоки и труб

небольшого диаметра, наматываемых на вертушку 1. Предварительно заостренный конец проволоки пропускается через отверстие волок 2 и закрепляется на барабане 3, который приводится во вращение от электродвигателя через редуктор и зубчатую передачу 4. Существуют также станы многократного волочения, имеющие до 20 барабанов с установленными перед каждым из них волокнами.

Ценные станы с прямолинейным движением тянущего устройства (рис. 3.67, в) применяют для волочения прутков и труб, которые не могут наматываться в бунты. На этом стане конец прутка пропускают через отверстие волок 2 и захватывают клещами 5, которые закреплены на каретке 6. Каретка через тяговый крюк 7 перемещается пластинчатой цепью 8, приводимой в движение от звездочки 9, которая вращается от электродвигателя 11 через редуктор 10.

Волочение, как правило, осуществляют в холодном состоянии, а потому оно сопровождается упрочнением (наклепом) металла. Исходными заготовками служат прокатанные или прессованные прутки и трубы из стали, цветных металлов и их сплавов. Величина деформации за один проход ограничена: $\rho = 1,25 - 1,45$. Если для получения необходимых профилей требуется большая деформация, то применяют волочение за несколько переходов протягиванием через ряд постепенно уменьшающихся по величине отверстий. Для снятия наклепа после каждого перехода металл подвергают промежуточному отжигу. Для уменьшения силы трения металла об инструмент полируют отверстие в волокне и применяют различные смазки - минеральные масла, олифу, графит, тальк, мыла, фосфатные и металлические покрытия и др.

Продукция, получаемая волочением

Сортамент изделий, изготовленных волочением, очень разнообразен: проволока **0,002 - 10 мм** и фасонные профили (рис. 3.68, б), трубы диаметром от 0,3 до 500 мм с толщиной стенки от 0,05 до 5 - 6 мм.

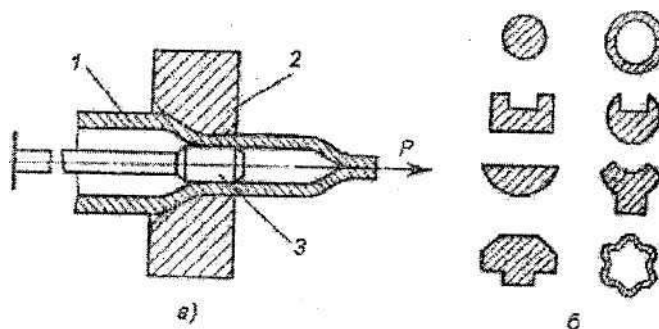


Рис. 3.68. Схема волочения трубы (а) и примеры профилей, получаемых волочением (б)

Волочение труб можно выполнять без оправки, для уменьшения только внешнего диаметра (*редуцирование*), и с оправкой (для уменьшения внешнего диаметра и толщины стенки). На рис. 3.68, а, показана схема волочения трубы 1 на длинной закрепленной оправке 3. В этом случае профиль полученной трубы

определяется зазором между волокой 2 и оправкой 3. Волочение обеспечивает высокую точность размеров (стальная проволока диаметром 1,0 - 1,6 мм имеет допуск 0,02 мм), высокое качество поверхности, получение очень тонких профилей. Метод дает возможность широко варьировать (за счет наклепа, а также термической обработки) диапазон прочностных и пластических свойств металла готового изделия, резко сокращает отходы и увеличивает производительность. Отличительной чертой процесса волочения является его универсальность (простота и быстрота замены инструмента), что делает его очень распространенным.

3.3.6. Прессование

Прессование - процесс получения изделий путем выдавливания нагретого металла из замкнутой полости через отверстие инструмента. Существуют 2 метода прессования: прямой и обратный (рис. 3.69). При *прямом прессовании* металл выдавливается в направлении движения пуансона. При *обратном прессовании* металл движется из контейнера навстречу движению пуансона.

Оборудование и инструмент

Для прессования применяют гидравлические прессы с горизонтальным или вертикальным расположением пуансона.

Инструмент для прессования состоит из *контейнера, матрицы, пуансона (штемпеля), иглы и иглодержателя* (при прессовании полых профилей и труб). Инструмент работает в очень тяжелых условиях: при температурах 800 - 1200 °С и при высоких удельных нагрузках. Его изготавливают из высококачественных инструментальных сталей и жаропрочных сплавов. Износ инструмента уменьшают применением смазок: графит, стекло, порошки меди, никеля, окись цинка, дисульфид молибдена и др.

Особенности прессования. Применение

При прессовании реализуется схема *всестороннего неравномерного сжатия*, при которой даже хрупкие материалы типа мрамора и малопластичные металлы и сплавы имеют весьма высокую пластичность. То есть, прессованием можно обрабатывать материалы, которые ввиду их низкой пластичности другими методами деформировать невозможно (чугуны и др.). Коэффициент вытяжки μ при прессовании может быть равным 30-50.

ГЛАВА 4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Свойства инструментальных материалов

Режущие инструменты работают в условиях больших силовых нагрузок, высоких температур и трения, поэтому материал рабочей части инструмента должен иметь высокие допустимые напряжения на изгиб, растяжение, сжатие, кручение, а также высокую твердость. Твердость рабочей части должна значительно превышать твердость материала заготовки.

Высокие прочностные свойства необходимы, чтобы инструмент обладал сопротивляемостью соответствующим деформациям в процессе резания, а достаточная вязкость позволяла бы воспринимать ударные динамические нагрузки, возникающие при обработке заготовок из хрупких материалов и заготовок с прерывистой поверхностью. Инструментальные материалы должны иметь высокую *красностойкость*, т. е. сохранять большую твердость при высоких температурах. Важнейшей характеристикой материала инструмента является *износостойкость*: чем выше износостойкость, тем медленнее изнашивается инструмент. Это значит, что разброс размеров деталей, последовательно обрабатываемых одним и тем же инструментом, будет минимальным.

4.2. Инструментальные стали

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,7-1,3 % С. Для режущих инструментов применяют стали У9А, У10А, УНА и др. После термообработки стали имеют красностойкость 200-240 °С. При достижении этих температур твердость стали резко падает и инструмент не может выполнять работу резания. Допустимые скорости резания не превышают 18 м/мин. Из этих сталей изготавливают метчики, плашки, развертки и т. д.

Легированные инструментальные стали - это углеродистые стали, легированные хромом, вольфрамом, марганцем, кремнием, ванадием и др. Легированные стали по сравнению с углеродистыми имеют повышенную вязкость в закаленном состоянии и красностойкость 250-300 °С. Для изготовления плашек, разверток, протяжек, сверл используют стали 9ХС, ХВСГФ и др. Допустимые скорости резания до 25 м/мин.

Быстрорежущие стали содержат 5,5-19 % вольфрама, 2,3-5,5 % молибдена, 3,8-4,4 % хрома, 2-10 % кобальта и ванадия, а также 0,8-1,1 % углерода. Для изготовления режущих инструментов применяют стали Р6М5, Р18, Р9К5 и др. Быстрорежущие стали имеют красностойкость 600-640 °С, обладают повышенной износостойкостью и могут работать со скоростями до 100 м/мин. Из быстрорежущих сталей изготавливают инструменты простой и сложной формы: резцы, концевые фрезы, сверла, зенкеры, червячные зуборезные фрезы и др.

В целях экономии из быстрорежущих сталей обычно изготавливают только рабочую часть инструмента, которую сваривают с хвостовой частью, изготовленной из конструкционной стали.

4.3. Твердые сплавы

Инструментальные твердые сплавы - это спеченные многофазные композиции, состоящие из твердых, тугоплавких соединений – карбидов вольфрама, титана, тантала - и металлического кобальта. Твердые сплавы делят на группы: *вольфрамовую* (ВК6, ВК10 и др.), *титановольфрамовую* (Т15К6, Т5К10 и др.), *титанотанталовольфрамовую* (ТТ7К12, ТТ10К8Б). Твердые сплавы применяют в виде пластин определенных форм и размеров, которые припаиваются к корпусам инструментов или крепятся механическим способом.

Твердые сплавы имеют высокую износостойкость и теплостойкость 800-1250°C, что позволяет вести обработку со скоростями до 800 м/мин. Недостатком твердых сплавов является низкая пластичность.

Твердые сплавы используют для обработки заготовок из хрупких и вязких сплавов; из труднообрабатываемых коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов; из твердых чугунов, закаленных сталей, сплавов титана, керамики и т. д.

4.4. Сверхтвердые и керамические материалы

Инструментальные материалы на основе нитрида бора (композиционные) относятся к *сверхтвердым*, а на основе оксида алюминия - к *керамическим*.

Существует несколько групп материалов на основе модификаций нитрида бора. Так, материалы на основе фазового превращения графитоподобного нитрида бора в кубический (композит 01 - *эльбор* и композит 02 - *белбор*) применяются для точения и фрезерования закаленных сталей и чугунов любой твердости, а также твердых сплавов с содержанием кобальта более 15 %. Материалы на основе превращения вюрцитного нитрида бора в кубический (композит 09 - *ПТНБ* и композит 10 - *гексанит-Р*) применяются для обработки сталей и чугунов любой твердости и твердых сплавов.

Керамические материалы также делятся на несколько групп: *оксидная "белая" керамика*, состоящая из Al_2O_3 и легированная ZrO_2 и другими оксидами, применяется для обработки незакаленных сталей и серых чугунов со скоростями до 15 м/с; *оксидно-карбидная "черная" керамика*,

состоящая из Al_2O_3 , TiC и других карбидов тугоплавких металлов, применяется для обработки ковких, высокопрочных, отбеленных модифицированных чугунов и закаленных сталей.

Пластины из таких материалов крепят к корпусам механическим способом либо пайкой, выполнив предварительно металлизацию пластин.

4.5. Абразивные материалы

Абразивные материалы - мелкозернистые или порошковые вещества (химические соединения элементов), используемые для изготовления абразивных инструментов: шлифовальных кругов, головок, сегментов, брусков и т.д. К ним относят: электрокорунды, карбиды кремния, карбиды бора, синтетические алмазы, оксид хрома, славутич и др.

Абразивные материалы имеют высокие твердость, теплостойкость (до 1800 °С) и износостойкость, что позволяет применять скорости резания до 100 м/с. Инструменты из абразивных материалов используют главным образом для окончательной обработки деталей, когда предъявляются повышенные требования к точности и шероховатости обработанных поверхностей.

Шлифовальные круги из электрокорунда применяют для обработки различных сталей и сплавов; из карбидов кремния - для обработки вязких сплавов, для обработки и заточки твердосплавных и минералокерамических режущих инструментов. Порошки карбида бора используют для притирочных и доводочных материалов. *Алмазы* составляют особую группу материалов. В промышленности используют природные и синтетические алмазы. Алмаз является самым твердым материалом, имеет высокую теплостойкость и износостойкость, у него не происходит слипания со многими материалами. Недостаток алмазов - их хрупкость. Алмазы используют для изготовления алмазных инструментов (круги, бруски, пилы, ленты) и доводочных порошков. Кристаллы алмазов применяют для оснащения режущих инструментов (резцов, сверл). Наиболее¹ широко используют алмазные резцы для тонкого точения и растачивания деталей из жаропрочных сталей и сплавов, сплавов алюминия, меди и неметаллических твердых материалов. Обработку ведут со скоростями резания до 20 м/с. Поверхности деталей, обработанные в этих условиях, имеют низкую шероховатость и высокую точность размеров.

ГЛАВА 5. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

5.1. Кинематические и геометрические параметры резания

5.1.1. Физические основы обработки металлов резанием

Кинематика резания

Обработка металлов резанием - это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей детали. Чтобы срезать с заготовки слой металла, необходимо режущему инструменту и заготовке сообщить относительные движения. Поэтому инструмент и заготовку устанавливают и закрепляют в рабочих органах станков, которые обеспечивают эти относительные движения: в шпинделе, на столе, в револьверной головке, в инструментальном магазине. Движения рабочих органов станков делят на движения резания, установочные и вспомогательные. Движения, которые вызывают срезание с заготовки слоя металла, называют *движениями резания*. К ним относят главное движение резания D_g и движение подачи D_s . *Главное движение* определяет скорость деформирования и отделения стружки, а *движение подачи* обеспечивает непрерывность врезания режущей кромки инструмента в материал заготовки. Эти движения могут быть непрерывными, прерывистыми, вращательными, поступательными, однако главное движение всегда одно, а движений подачи может быть несколько. Скорость главного движения резания обозначают V , скорость движения подачи - V_s . Движения, обеспечивающие взаимное положение инструмента и заготовки для срезания с нее заданного слоя материала, называют *установочными*. К *вспомогательным движениям* относят закрепление заготовки и инструмента, быстрое перемещение рабочих органов станка, переключение скоростей движений резания, транспортирование заготовки и т. д.

Формообразование поверхности заготовки резанием представляется схемой обработки, на которой условно изображают обрабатываемую заготовку, ее установку и закрепление на станке, закрепление и положение инструмента относительно заготовки, а также движения резания и их характер, например, вращательное, возвратно-поступательное (рис. 5.1, г). Закрепление заготовки показывают полуконструктивно или условными знаками. При резании на заготовке различают *обрабатываемую поверхность*, с которой срезается припуск; *обработанную поверхность*, с которой припуск срезан; и *поверхность резания*, образуемую в процессе обработки главной режущей кромкой инструмента.

Методы формообразования поверхностей

Пространственную форму детали определяет сочетание различных геометрических поверхностей: плоских, круговых цилиндрических и конических, шаровых, торовых и т.д. Любая геометрическая поверхность представляет собой совокупность последовательных положений следов одной производящей линии, называемой *образующей*, которая движется по другой производящей линии, называемой *направляющей*. Так, для образования круговой цилиндрической поверхности необходимо прямую линию (образующую) перемещать по окружности (направляющей).

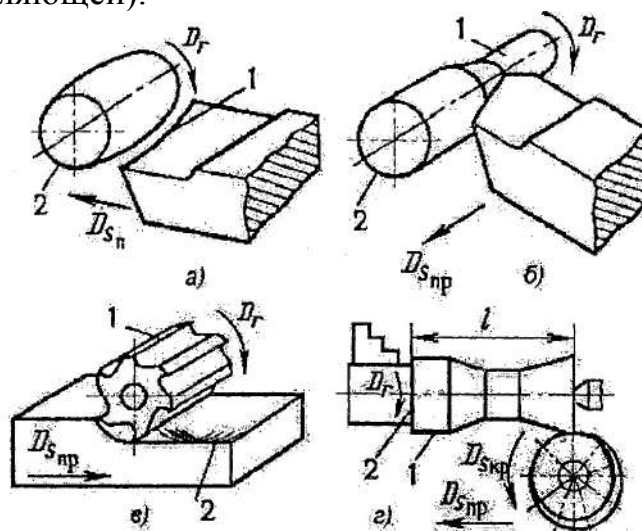


Рис. 5.1. Схемы формообразования поверхностей заготовок

При обработке заготовок на металлорежущих станках образующие и направляющие линии в большинстве случаев в явном виде отсутствуют. Они воспроизводятся комбинацией движений заготовки и инструмента, скорости которых строго согласованы. Движения резания являются формообразующими. При обработке резанием заготовок деталей машин реализуется четыре метода формообразования поверхностей: копирования, следов, касания и обкатки.

При образовании поверхностей *методом копирования* режущая кромка инструмента является реальной образующей линией 1 (рис. 5.1, а). Направляющая линия 2 воспроизводится вращением заготовки. Формообразующим является главное движение резания. Движение подачи необходимо для получения геометрической поверхности - заданного размера. При образовании поверхностей по *методу следов* образующая линия 1 является траекторией движения вершины инструмента, а направляющая линия 2 воспроизводится вращением заготовки (рис. 5.1, б).

Формообразующими являются движения резания.

При образовании поверхностей по *методу касания* образующей линией 1 является режущая кромка инструмента (рис. 5.1, в), а направляющей линией 2 служит касательная к ряду вспомогательных линий - траекториям точек режущей кромки инструмента. Формообразующим является движение подачи.

При образовании поверхностей по *методу обкатки* направляющая линия 2 воспроизводится вращением заготовки. Образующая линия 1 является огибающей к ряду последовательных положений режущей кромки инструмента относительно заготовки благодаря согласованию двух движений подачи (рис. 5.1, г). Скорости движений согласуются так, что за время прохождения круглым резцом расстояния 1 он делает один полный оборот относительно своей оси вращения.

Режим резания. Шероховатость поверхности

Режим резания характеризует напряженность процесса обработки и представляет собой совокупность значений скорости главного движения резания, скорости движения подачи и глубины резания.

Скорость главного движения резания V (м/мин или м/с) - это скорость перемещения точки режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности в направлении главного движения. Для вращательного главного движения скорость резания:

$$V = \pi \cdot D_{\text{заг}} \cdot n \cdot 0,001 \text{ (м/мин)},$$

где $D_{\text{заг}}$ - наибольший диаметр обрабатываемой заготовки, мм; n - частота вращения заготовки, мин^{-1} .

Скорость движения подачи V_s - это скорость рассматриваемой точки режущей кромки в направлении движения подачи. Предусматривается также понятие *подача* s - отношение расстояния, пройденного точкой режущей кромки в направлении движения подачи, к числу циклов или долей цикла другого движения во время резания (подача на оборот, на двойной ход, на зуб).

Глубина резания I (мм) - это расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней и пройденное за один рабочий ход инструмента. Форма и размеры сечения срезаемого слоя материала зависят от элементов режима резания, геометрических параметров режущего инструмента и формы режущей кромки. При токарной обработке в резании участвуют одновременно два движения, поэтому траекторией движения вершины резца относительно заготовки будет винтовая линия. На заготовке останутся гребешки, которые образуют микронеровности на обработанной поверхности. Совокупность микровыступов и микровпадин характеризует *шероховатость поверхности*.

Шероховатость оценивается несколькими параметрами, в частности, параметром R_a - *средним арифметическим отклонением профиля*, т. е. средним арифметическим абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины обработанной поверхности. Предпочтительные значения R_a (мкм); для предварительной черновой обработки—100-12,5; для чистовой обра-

ботки-6,3-0,4; для отделочной и доводочной обработки-0,2-0,012.

Геометрические параметры режущего инструмента

При всем многообразии конструкций режущих инструментов они имеют много общего, и подробное изучение токарного резца позволяет ограничиться рассмотрением лишь специфических особенностей конструкций других инструментов.

Токарный резец (рис. 5.2) состоит из *крепежной части* (державки) II, при помощи которой он крепится в резцедержателе, и *режущей части* I, которую образуют следующие элементы: 1- передняя поверхность A_y ; 2 -главная режущая кромка К; 3 - вспомогательная режущая кромка К; 4 -главная задняя поверхность A_{oc} ; 5 - вспомогательная задняя поверхность A_{oc}' ; 6 - вершина.

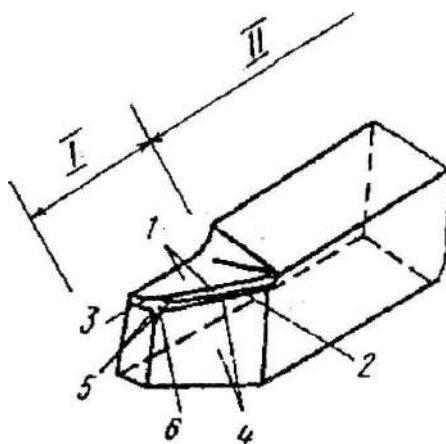


Рис. 5.2. Элементы токарного резца

Расположение поверхностей режущей части резца задается углами, для определения которых вводят **статическую систему координат** (рис. 5.3). В эту систему входят: *основная плоскость* P_v - плоскость, проведенная через точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного движения; *рабочая плоскость* P_s - плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения резания и движения подачи; *плоскость резания* P_n - плоскость, касательная к режущей кромке и перпендикулярная основной плоскости; *главная секущая плоскость* P_t - плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания. В главной секущей плоскости измеряют: 1) *главный передний угол* γ - угол между передней поверхностью и основной плоскостью (рис. 5.4). С увеличением угла γ уменьшается деформация срезаемого слоя, снижаются силы резания, повышается качество обработанной поверхности, но одновременно снижается прочность лезвия, ухудшается теплоотвод от режущей кромки. Обычно угол γ имеет значения от -10° до $+20^\circ$; 2) *главный задний угол* α - угол между главной задней поверхностью и плоскостью резания. Наличие угла α уменьшает трение между главной задней

поверхностью инструмента и поверхностью резания, что уменьшает износ инструмента; 3) *угол заострения* β – угол между передней и задней поверхностями.

В плоскости резания измеряют *угол наклона кромки* λ – угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью. С увеличением угла λ качество обработанной поверхности ухудшается.

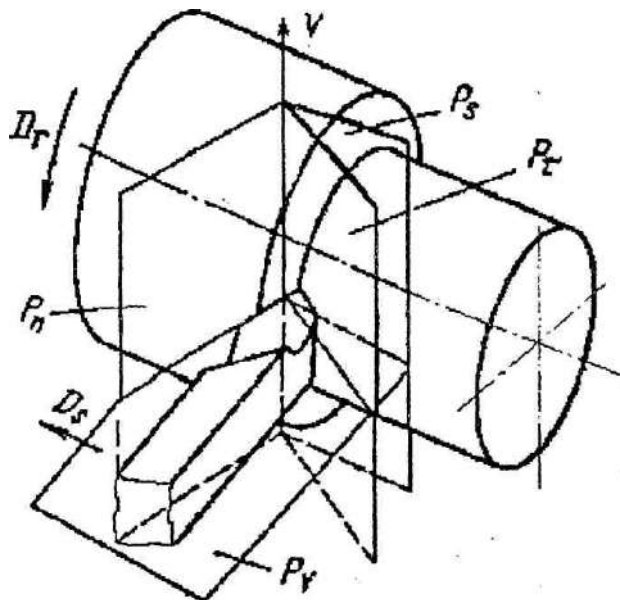


Рис. 5.3. Координатные плоскости при точении

В основной плоскости измеряют *угол в плане* ϕ – угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. С уменьшением угла ϕ шероховатость обработанной поверхности снижается, но возрастает сила резания.

Кроме вышеперечисленных углов, в процессе проектирования и изготовления инструмента, а также для расчетов изменения элементов лезвия в процессе резания задаются и измеряются некоторые другие углы в статической и других системах координат.

Образование и виды стружки

Упрощенно процесс резания можно представить следующим образом: в начальный момент, когда движущийся резец вдавливается в металл, в срезаемом слое возникают *упругие деформации* (рис. 5.5, а, зона I). При дальнейшем движении резца упругие деформации, увеличиваясь по абсолютному значению, переходят в *пластические* (рис. 5.5, а, зона II). В при резцовом срезаемом слое материала заготовки возникает сложное упруго напряженное состояние. Такое состояние приводит к смещению зерен металла друг относительно друга – *сдвиговым деформациям* (рис 5.5, а). В результате этого сдвигается элементарный объем металла по *плоскости скалывания* 0-0 и образуется

элемент стружки e (рис. 5.5, б). Далее процесс повторяется, и образуется следующий элемент (рис. 5.5, в).

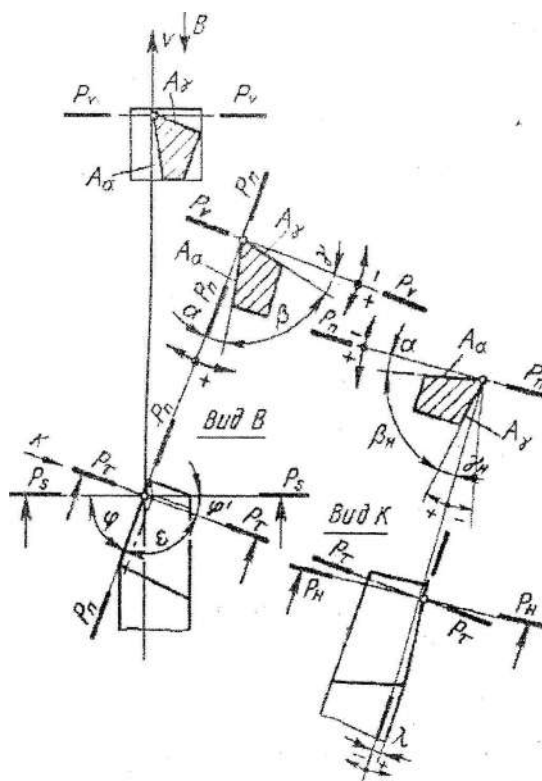


Рис. 5.4. Углы токарного резца

Характер деформирования срезаемого слоя зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента, режима резания, условий обработки. При резании пластичных металлов и материалов средней твердости преобладает пластическая деформация, у хрупких металлов пластическая деформация практически отсутствует.

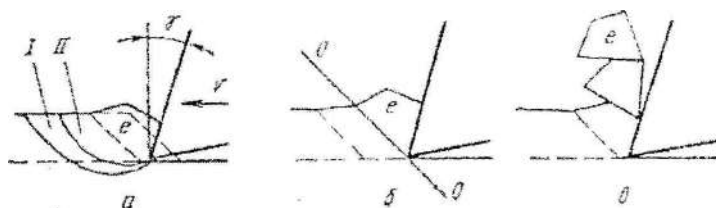


Рис. 5.5. Процесс образования стружки

Выделяют следующие виды стружки: сливную, суставчатую, элементную. *Сливная стружка*, образующаяся при резании пластичных металлов, представляет собой сплошную ленту с гладкой прирезцовой стороной, на внешней стороне стружки заметны слабые пилообразные зазубрины. *Суставчатая стружка*, образующаяся при резании металлов средней твердости, представляет собой ленту с гладкой прирезцовой стороной, а на внешней стороне имеет ярко выраженные зазубрины (рис. 5.5, в). *Элементная стружка* образуется при

резании хрупких металлов и состоит из отдельных, не связанных между собой элементов. Вид образующейся стружки влияет на стойкость режущего инструмента, шероховатость обработанной поверхности, силу резания, конструкцию инструмента и определяет сложность отвода стружки из зоны резания и ее транспортирования.

Силы резания

Деформирование и срезание с заготовки слоя металла происходит под действием внешней силы P , приложенной со стороны инструмента к обрабатываемой заготовке. Работа этой силы расходуется на упругое и пластическое деформирование металла, отделение стружки, преодоление сил трения задней поверхности инструмента о заготовку и стружки о переднюю поверхность инструмента.

В результате сопротивления металла деформированию возникают реактивные силы, действующие на режущий инструмент. Систему реактивных сил приводят к *равнодействующей силе* R . Считают, что точка приложения силы $Я$ находится на главной режущей кромке. Величина равнодействующей силы резания зависит от свойств обрабатываемого металла, скорости главного движения резания, скорости движения подачи, глубины резания, углов резца, условий резания.

При продольном точении равнодействующую силу резания обычно раскладывают на три составляющие P_z , P_x и P_y (рис. 5.6). Составляющая силы резания P_x совпадает по направлению со скоростью главного движения резания в вершине резца, ее называют *главной составляющей силы резания*. Составляющая P_x параллельна оси главного вращательного движения резания, ее называют *осевой составляющей силы резания*. Составляющая P_y направлена по радиусу главного вращательного движения резания в вершине резца, ее называют *радиальной составляющей силы резания*.

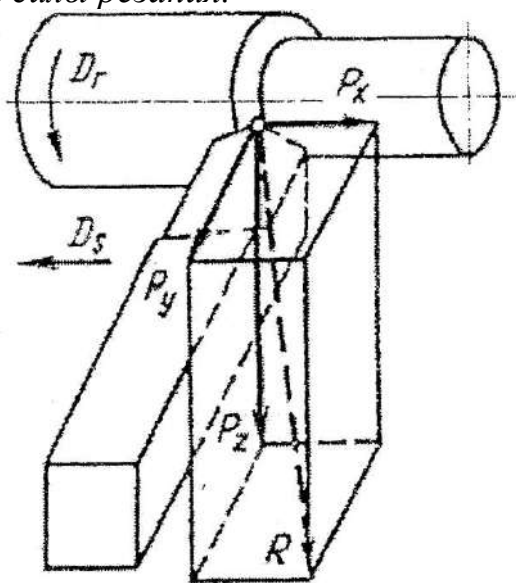


Рис. 5.6. Силы резания при точении

Составляющие силы резания определяют по эмпирическим формулам с использованием справочных данных. По рассчитанным составляющим P_z , P_x и P_y определяют крутящий момент на шпинделе станка, эффективную

Мощность резания, деформацию изгиба заготовки, изгибающий момент, действующий на стержень резца, а также ведут динамический расчет механизмов коробок скоростей и подач станка и т.п.

Наростообразование при резании

При обработке пластичных металлов на передней поверхности инструмента может образоваться слой металла, который называют *наростом*. Образование нароста объясняется тем, что при некоторых условиях обработки силы трения между передней поверхностью инструмента и срезанным слоем металла становятся больше сил внутреннего сцепления материала стружки, и при определенных температурных условиях металл прочно оседает на передней поверхности (рис. 5.7). Размеры и форма нароста постоянно меняются, частицы нароста уносятся стружкой и обработанной поверхностью заготовки, нарост срывается с передней поверхности инструмента и возникает вновь. Частота срывов нароста зависит от скорости резания.

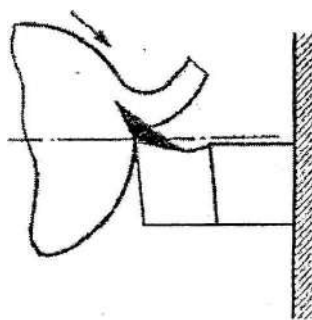


Рис. 5.7. Схема образования нароста

Нарост оказывает как положительное, так и отрицательное влияние на резание.

Положительным является то, что образование нароста приводит к увеличению переднего угла, а следовательно, к уменьшению силы резания. Нарост уменьшает износ инструмента по передней поверхности, а также улучшает теплоотвод от режущего клина.

Но нарост увеличивает шероховатость обработанной поверхности и уменьшает геометрическую точность обработанной заготовки вследствие изменения вылета резца. Изменение переднего угла вызывает изменение силы резания, что приводит к вибрации станка, а это ухудшает качество обработанной поверхности.

Таким образом, нарост полезен при черновой обработке, когда возникают большие силы резания, снимается большой слой металла и выделяется большое

количество тепла. При чистовой обработке, наоборот, нарост вреден, так как приводит к снижению качества обработанной поверхности.

Интенсивность образования нароста в значительной степени зависит от скорости главного движения резания: при скоростях до 12 м/мин и более 50 м/мин нарост практически не образуется. Для предотвращения нароста рекомендуется также изменять геометрические параметры инструмента, применять смазочно-охлаждающие жидкости, тщательно обрабатывать переднюю поверхность инструмента.

Упрочнение при резании

Результатом упругого и пластического деформирования материала обрабатываемой заготовки является *упрочнение* (наклепывание) поверхностного слоя заготовки. При анализе процесса резания принято считать инструмент острым, однако режущая кромка всегда имеет радиус закругления ρ (рис. 5.8), который при обычных методах заточки составляет примерно 0,02 мм. Следовательно, инструмент может срезать заготовки стружку только при условии, что глубина резания t соизмерима с радиусом ρ . В стружку переходит часть слоя металла, лежащая выше линии CD. Слой металла, лежащий между линиями AB и CD, будет упругопластически деформироваться.

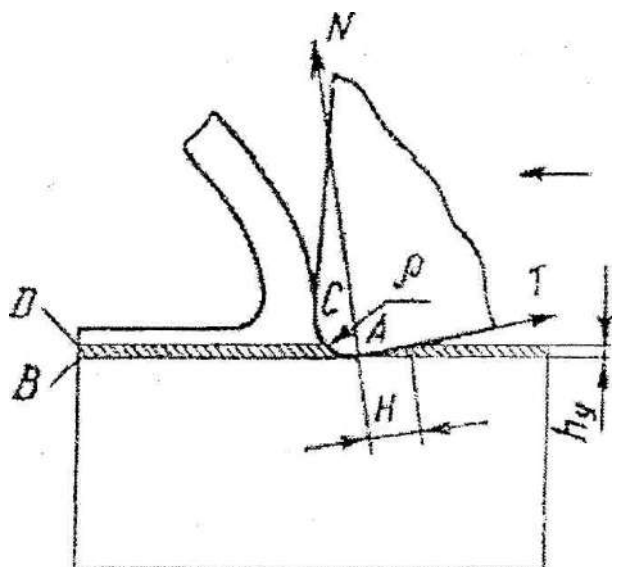


Рис. 5.8. Схема упрочнения при резании

При работе инструмента радиус ρ быстро растет вследствие затупления режущей кромки, и расстояние между линиями AB и CD увеличивается. Упрочнение металла обработанной заготовки проявляется в повышении ее поверхностной твердости, которая может возрасти в 1,5-2 раза, а глубина наклепанного слоя составляет 0,02 - 0,2 мм. Значения твердости и глубины упрочненного слоя зависят от способа обработки (максимальные - при сверлении), свойств

материала обрабатываемой заготовки, геометрии инструмента, режима резания. После перемещения резца относительно обработанной поверхности происходит упругое восстановление деформированного слоя на величину h_y в результате образуется контактная площадка шириной H между обработанной поверхностью и задней поверхностью инструмента. Со стороны обработанной поверхности возникают силы нормального давления N и трения F . Чем больше упругая деформация, тем больше сила трения. Для уменьшения силы трения у инструмента предусматривается задний угол.

Изменениям состояния поверхностного слоя препятствуют нижележащие слои материала. В сложном взаимодействии явлений в поверхностных и нижележащих слоях материала возникают *остаточные напряжения*, которые могут быть растягивающими или сжимающими. *Напряжения растяжения* снижают предел выносливости материала заготовки, так как приводят к появлению микротрещин в поверхностном слое. *Напряжения сжатия*, напротив, повышают предел выносливости деталей. Следовательно, окончательную обработку поверхностей заготовок следует выполнять такими методами, чтобы в поверхностном слое возникали остаточные напряжения сжатия, либо напряжения отсутствовали совсем.

Наклеп обработанной поверхности можно рассматривать как благоприятное явление, если возникающие остаточные напряжения являются сжимающими. Однако наклеп, полученный при черновой обработке, отрицательно влияет на резание при последующей чистовой обработке, когда срезаются тонкие стружки, так как он снижает стойкость инструмента, а шероховатость поверхности увеличивается.

Тепловыделение при резании

Резание сопровождается образованием теплоты вследствие упруго-пластического деформирования металла в зоне стружкообразования, трения стружки о переднюю поверхность инструмента, трения задней поверхности о поверхность резания. Из зоны резания тепло отводится стружкой (25-85 %), поглощается заготовкой (10-50 %) и инструментом (2-8 %), а также отводится в окружающую среду.

Теплообразование отрицательно влияет на процесс резания. Нагрев инструмента до высоких температур приводит к структурным изменениям, снижению твердости и потере режущей способности.

Нагрев вызывает изменение геометрических размеров инструмента, из-за чего возникают отклонения размеров и формы обработанных поверхностей от заданных. Нагрев заготовки также приводит к изменению ее размеров. При жестком закреплении на станке заготовка начинает деформироваться, что снижает точность обработки. Для уменьшения отрицательного влияния тепловыделения на качество обработки резание следует вести с применением *смазочно-охлаждающих сред*. В зависимости от технологического метода обработки, ре-

жима резания, материалов заготовки и инструмента применяют различные смазочно-охлаждающие среды, которые можно разделить на следующие группы:

1) *жидкости*: водные растворы солей, эмульсии, растворы мыл, масла и др.;

2) *газы и газообразные вещества*: углекислый газ, азот, четыреххлористый углерод, пары поверхностно-активных веществ, распыленные жидкости и др.;

3) *твердые вещества*: порошки воска, парафина, битума, мыльные порошки и др.

Чаще всего применяют смазочно-охлаждающие жидкости. Обладая смазывающими свойствами, жидкости снижают трение и работу деформирования, общее количество выделяющегося тепла уменьшается. Жидкости отводят тепло из зоны резания, охлаждая инструмент и заготовку. Смазывающее действие препятствует образованию нароста на инструменте, в результате чего снижается шероховатость и повышается точность обработанных поверхностей. При черновой обработке, когда необходимо сильное охлаждающее действие, широко используют различные растворы и эмульсии на водной основе. При чистовой обработке, когда требуется получить высокое качество обработанной поверхности, используют различные масла. Подача жидкости в зону резания чаще всего выполняется через узкое сопло под давлением на переднюю поверхность инструмента, иногда жидкость подают тонкой струей под давлением со стороны задних поверхностей. Когда охлаждение режущего инструмента затруднено, жидкость подводят непосредственно в зону резания через каналы в теле режущего инструмента, например, при сверлении глубоких отверстий.

Износ и стойкость инструмента

Трение между стружкой и передней поверхностью инструмента и между поверхностью резания и главной задней поверхностью приводит к изнашиванию режущего инструмента. Высокие контактные давления и тепловыделение вызывают следующие *виды изнашивания*: *абразивное* - в условиях сухого и полусухого трения; *окислительное* - образование и разрушение оксидных пленок; *адгезионное* - вырыв частиц материала инструмента материалом стружки или заготовки вследствие их молекулярного сцепления; *термическое* - структурные превращения в материале инструмента. Общий характер износа токарного резца представлен на рис. 5.9.

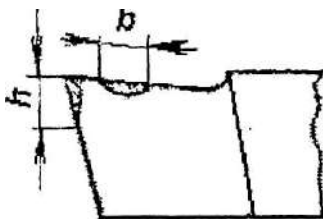


Рис. 5.9. Характер изнашивания токарного резца

При изнашивании резца на передней поверхности образуется *лунка* шириной b , а на главной задней поверхности - *ленточка* шириной h . Образование ленточки уменьшает глубину резания, так как изменяется вылет резца, а это снижает точность обработки.

Допустимое значение износа называют *критерием износа*. В большинстве случаев за критерий износа принимают износ инструмента h по главной задней поверхности. Для токарных резцов из быстрорежущей стали $h = 1,5-2$ мм, для резцов с пластинами твердого сплава $h = 0,8-1$ мм. Допустимый износ соответствует определенному периоду стойкости.

Под *периодом стойкости инструмента* T понимают суммарное время его работы (в мин) между переточками при определенном режиме резания. Период стойкости зависит от свойств материала инструмента и заготовки, режима резания, геометрии инструмента, условий обработки. Например, стойкость токарных резцов составляет 30-90 мин. Износ инструмента вызывает также рост силы резания, что увеличивает деформацию заготовки и инструмента и еще более снижает точность обработки. Растут глубина наклепанного слоя на заготовке и силы трения между заготовкой и инструментом, а это приводит к увеличению тепловыделения при резании.

Для уменьшения влияния износа инструмента на точность и качество обработки все шире применяются автоматические подналадчики металлорежущих станков и режущие инструменты с неперетачиваемыми пластинами из сверхтвердых и керамических материалов.

Вибрации при резании

При обработке заготовок иногда возникают периодические колебательные движения (*вибрации*) элементов системы *станок-приспособление - инструмент-заготовка*, и резание теряет устойчивость. Вибрации резко снижают качество обработанной поверхности (возникает шероховатость, появляется волнистость); усиливается переменный характер силы резания, а нагрузки на движущиеся детали станка возрастают в десятки раз, особенно в условиях резонанса, когда частота собственных колебаний системы совпадает с частотой колебаний, возникающих при резании; период стойкости инструмента резко падает; возникает сильный шум.

При резании *вынужденные (внешние) колебания* возникают под действием внешних периодических возмущающих сил из-за прерывистости процесса резания, неуравновешенности вращающихся масс, погрешностей изготовления и сборки передач. Вынужденные колебания устраняют, повышая жесткость станка и уменьшая величину возмущающих сил.

Автоколебания (незатухающие самоподдерживающиеся) создаются и управляются силами, возникающими в процессе резания, и после его прекращения исчезают. Причинами автоколебаний являются: изменение сил резания и трения на рабочих поверхностях инструмента; изменение сечения срезаемого

слоя металла; образование и срывы наростов; упругие деформации заготовки и инструмента. Низкочастотные автоколебания (50-500 Гц) вызывают волнистость на обработанной поверхности, высокочастотные (800-6000 Гц) - мелкую рябь. Автоколебания можно устранить, изменяя режим резания и геометрию инструмента; правильно, без дисбаланса, устанавливая заготовку на станке, а также обрабатывая заготовки на больших скоростях резания. Для гашения автоколебаний используют виброгасители: гидравлические, динамические, упругие и другие.

Однако вибрации могут положительно влиять на процесс резания. Сущность *вибрационного резания* состоит в том, что в процессе обработки создаются искусственные колебания инструмента с регулируемой частотой и заданной амплитудой в определенном направлении. Источник колебаний - высокочастотный генератор, частота колебаний 200-20000 Гц, амплитуда 0,02-0,002 мм. Оптимальные амплитуды и частоты колебаний задают, исходя из режима резания, технологического метода обработки и т. д. Колебания могут совпадать с направлением движения подачи или с направлением главного движения резания.

Вибрационное резание обеспечивает дробление стружки на отдельные элементы, снижает сопротивление металла деформированию и эффективную мощность резания, предупреждает наростообразование, однако в некоторых случаях снижает стойкость инструмента.

Точность, качество и производительность обработки

Под *точностью обработки* понимают соответствие размеров, формы и взаиморасположения обработанных поверхностей требованиям чертежа. Допустимые отклонения фактических размеров обработанных поверхностей деталей от их конструктивных размеров, указываемых в рабочем чертеже, регламентируются государственными стандартами. Предельные отклонения формы обработанных поверхностей от геометрически правильных поверхностей и точность их взаимного расположения также определяются государственными стандартами.

Одним из показателей *качества обработанной поверхности* является шероховатость.

Чем выше требования, предъявляемые к точности и качеству поверхностей, тем длительнее процесс обработки заготовки и сложнее технологический процесс изготовления детали. Самую высокую точность обработки обеспечивают адаптивные системы программного управления.

Производительность обработки определяет число деталей, изготавливаемых в единицу времени. Максимальная производительность достигается при работе с наибольшей подачей, глубиной и скоростью резания при наименьшей длине обрабатываемой поверхности и наименьшем припуске на обработку.

Элементы режима резания назначают в следующей последовательности:

Сначала назначают глубину резания, при этом стремятся весь припуск на обработку срезать за один рабочий ход режущего инструмента. Если необходимо делать два рабочих хода, то при первом ходе снимают «80 % припуска, при втором (чистовом)- 20 % припуска. Затем выбирают значение подачи, обычно наибольшее допустимое, с учетом требований точности и допустимой шероховатости обработанной поверхности, а также мощности станка, режущих свойств инструмента. Наконец, определяют скорость главного движения резания, исходя из выбранных глубины резания, подачи и стойкости режущего инструмента. После вычисления скорости резания определяют частоту вращения шпинделя станка, соответствующую этой скорости резания. На станках со ступенчатым регулированием частоты вращения назначают ближайшую меньшую частоту вращения. Затем определяют составляющие силы резания P_z , P_x , P_y ; эффективную мощность резания и мощность электродвигателя станка. Исходя из размеров обрабатываемой заготовки и мощности электродвигателя, выбирают модель станка, после чего окончательно уточняют режим резания в соответствии с паспортными техническими характеристиками выбранной модели станка.

ГЛАВА 6. ОБРАБОТКА ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

6.1. Металлорежущие станки

6.1.1. Классификация металлорежущих станков

Серийно выпускаемые металлорежущие станки классифицируются согласно *общегосударственной единой системе условных обозначений станков*. Она построена по десятичной системе: все металлорежущие станки разбиты на десять групп (группа 0 - резервная, 1 - токарные, 2 - сверлильные и расточные, 3 - шлифовальные и доводочные, 4 - электрофизические и электрохимические, 5 - зубо- и резьбообрабатывающие, 6 - фрезерные, 7 - строгальные, долбежные и протяжные, 8 - разрезные, 9 - разные), группа - на десять типов, а тип - на десять типоразмеров. В *группу* объединены станки по общности технологического метода обработки или близкие по назначению. *Типы* станков характеризуют такие признаки, как назначение, степень универсальности, число главных рабочих органов, конструктивные особенности. Внутри, типа станки различают по техническим характеристикам.

В соответствии с этой классификацией каждому станку присваивают определенный *шифр*: первая цифра определяет группу станков, вторая - тип, третья (иногда третья и четвертая) - условный размер станка. Буква на втором или третьем месте позволяет различать станки одного типоразмера, но с разными техническими характеристиками. Буква в конце шифра означает модификацию станка одной базовой модели. Например, шифром ЗШ185 обозначен бесцентрово-шлифовальный станок (группа 3, тип 1), модернизированный (Ш), с наибольшим диаметром шлифуемой заготовки 85 мм (85). Шифры станков с числовым программным управлением (ЧПУ) содержат букву Ф. Станки также классифицируют по степени универсальности, по числу главных рабочих органов, по точности, по степени автоматизации и другим признакам.

6.1.2. Кинематика станков

Приводом станка называют совокупность механизмов, передающих движение от источника (электродвигателя) к рабочим органам станка (шпинделю, суппорту, столу). Различают приводы рабочих, вспомогательных и установочных перемещений заготовки и инструмента. Приводы станков бывают со ступенчатым и бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя и величины подачи. Приводы со *ступенчатым регулированием* выполняют в виде зубчатых коробок передач, обеспечивающих получение определенного ряда значений частоты вращения или скорости подачи. Системы *бесступенчатого регулирования*, включающие электродвигатели постоянного тока с тиристорной системой управления в сочетании с двух-четырёхступенчатыми коробками

передач, обеспечивают широкий диапазон частот вращения шпинделя и скоростей подачи, что предполагает возможность работы на строго расчетном режиме резания. *Передачей* называют механизм, передающий движение от одного элемента к другому (с вала на вал) или преобразующий одно движение в другое (вращательное в поступательное). В передаче элемент, передающий движение, называют *ведущим*, а элемент, получающий движение, - *ведомым*. Каждая передача характеризуется *передаточным отношением* i , т. е. числом, которое показывает, во сколько раз частота вращения ведомого элемента меньше или больше частоты вращения ведущего элемента. К основным передачам относятся ременная, цепная, зубчатая, червячная, реечная, винтовая.

Кинематической схемой металлорежущего станка называют условное графическое изображение всех механизмов и передач, которые передают движение от электродвигателя к исполнительным органам станка. Она дает представление об относительном расположении основных элементов привода и позволяет установить, в каком направлении передается движение и в какое движение оно преобразуется в любом механизме привода. Часть кинематической схемы, которая служит для передачи движения от электродвигателя к исполнительному органу или от одного исполнительного органа к другому, называют *кинематической цепью*. Различают кинематические цепи главного движения резания (рис. 6.1), движений подач и ускоренных перемещений. Переключением электромагнитных муфт $M_{31} - M_{34}$ и перемещением зубчатых колес на валах можно передавать движение с вала на вал через различные пары зубчатых колес, поэтому конечный вал IV будет иметь восемь различных частот вращения.

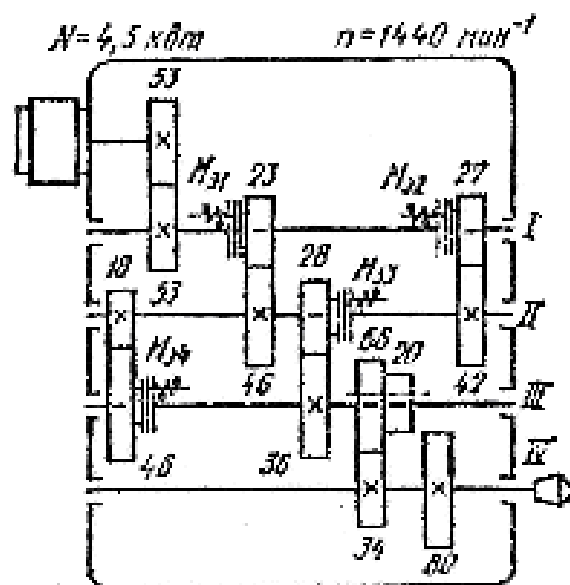


Рис. 6.1. Кинематическая цепь главного движения резания

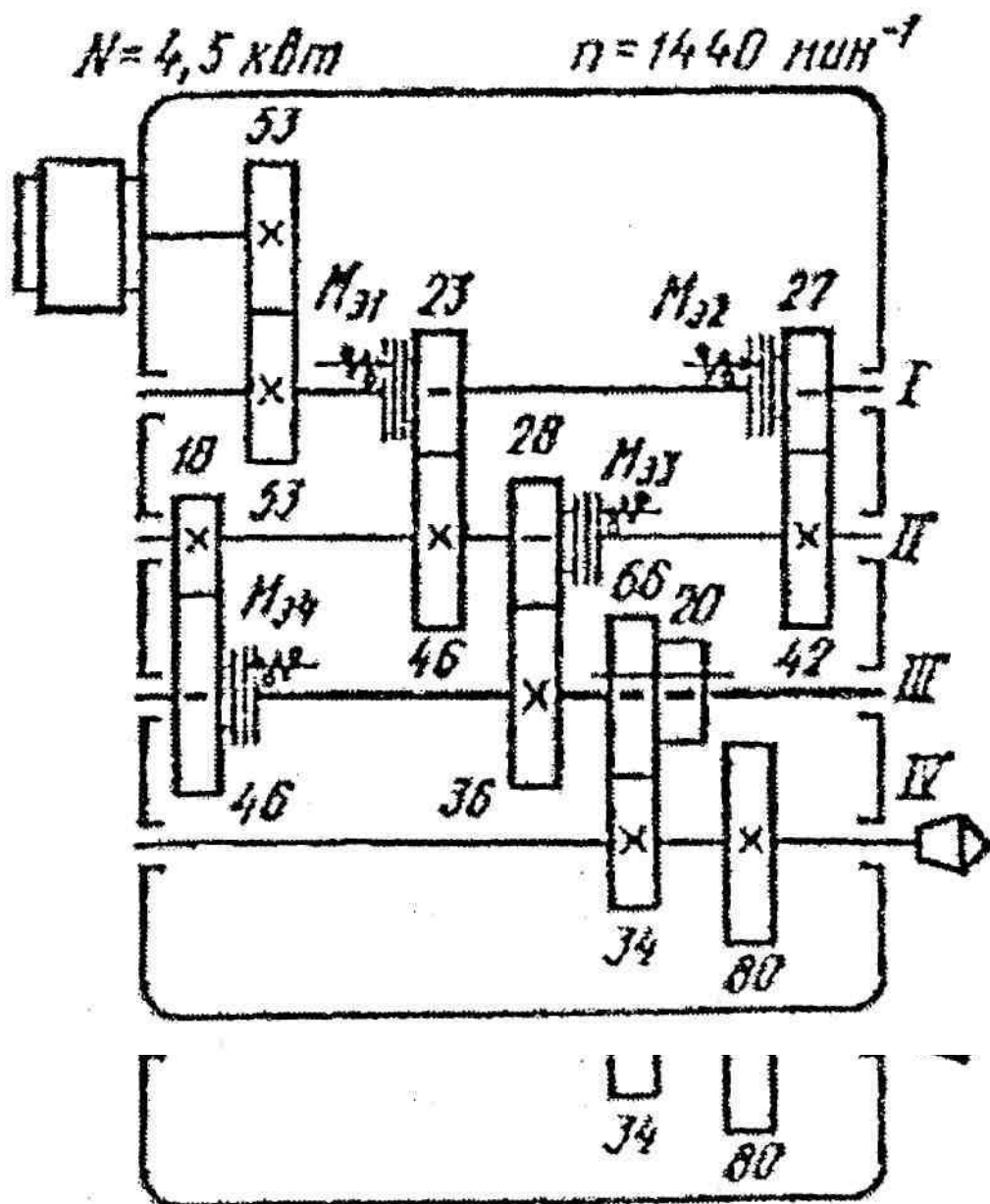
6.2.Обработка заготовок на токарных станках

6.2.1. Характеристика метода точения

Токарные станки предназначены для обработки поверхностей заготовок, имеющих форму тел вращения. Технологический метод формообразования поверхностей

заготовок точением характеризуется вращательным движением заготовки (главное движение резания) и поступательным движением инструмента - резца (движение подачи). Движение подачи осуществляется параллельно оси вращения заготовки (продольное движение подачи), перпендикулярно оси вращения заготовки (поперечное движение подачи), под углом к оси вращения заготовки (наклонное движение подачи).

Под *точением* понимают обработку наружных поверхностей заготовок. Разновидностями точения являются: *расточивание* - обработка внутренних поверхностей; *подрезание* - обработка торцовых плоских поверхностей; *разрезание* - разделение заготовки на части. На токарных станках выполняют черновую, получистовую и чистовую обработку поверхностей заготовок.



6.2.2. Типы токарных станков

По технологическому назначению станки токарной группы делятся на типы. *Токарно-винторезные станки* (рис. 6.2, а) применяют в условиях единичного производства для обработки небольших партий заготовок.

Токарно-револьверные станки (рис. 6.2, б) имеют специальное устройство для закрепления инструментов - револьверную головку и предназначены для обработки сложных заготовок, требующих применения большого числа режущих инструментов. *Токарно-карусельные станки* (рис. 6.2, в) предназначены для обработки крупных тяжелых заготовок, у которых отношение длины (высоты) заготовки к диаметру составляет 0,3-0,7. Особенностью станков является наличие круглого горизонтального стола-карусели с вертикальной осью вращения. *Многорезцовые токарные полуавтоматы* (рис. 6.2, е) предназначены для обработки наружных поверхностей заготовок типа ступенчатых валов, обработка нескольких поверхностей заготовки ведется одновременно. *Одношпиндельные токарно-револьверные автоматы* (рис. 6.2, г) используются для обработки заготовок небольших размеров, но сложной формы. Они работают по циклу параллельной обработки поверхностей и применяются для изготовления больших партий деталей. *Многошпиндельные автоматы параллельной обработки заготовок* (рис. 6.2, д) используются в массовом производстве, число одновременно обрабатываемых заготовок равно числу шпинделей. *Многошпиндельные автоматы последовательной обработки* (рис. 6.2, ж) предназначены для одновременной обработки нескольких заготовок (по числу шпинделей). На каждой из позиций заготовки находятся на разных стадиях обработки. Станкостроительная промышленность также производит широкую гамму токарных станков, оснащаемых системами ЧПУ.

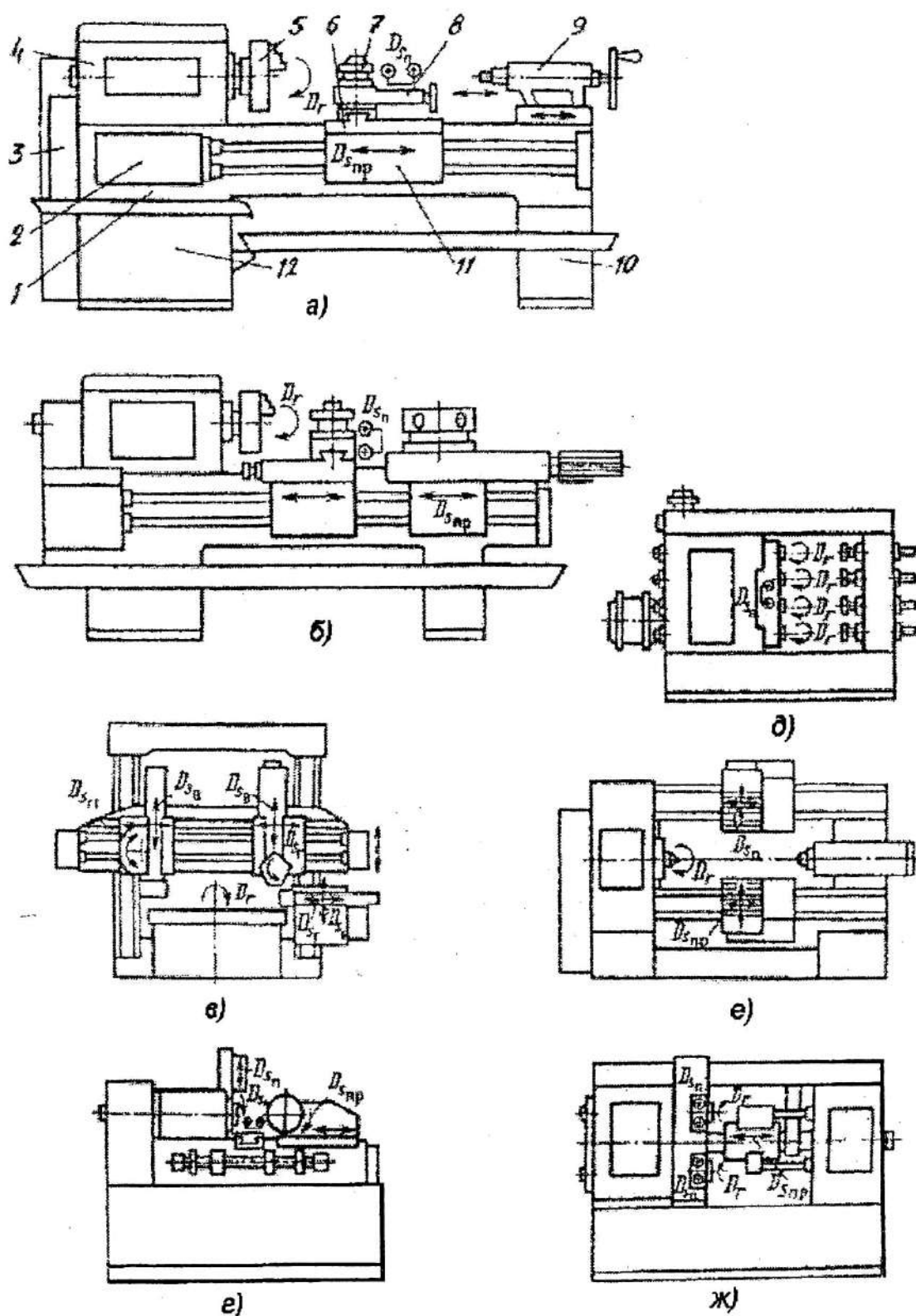


Рис. 6.2. Общие виды станков токарной группы

Токарно-винторезный станок (рис. 6.2, а) состоит из следующих узлов: станина 1 с направляющими закреплена на тумбах - передней 12 и задней 10. В передней бабке 4 смонтированы коробка скоростей и шпиндель. На шпинделе устанавливают приспособление для закрепления заготовок 5. Коробку подач 2

крепят к лицевой стороне станины. С левой стороны станины установлена коробка сменных зубчатых колес 3. Продольный суппорт 6 перемещается по направляющим станины, на нем смонтирована поперечная каретка с верхним суппортом 8, на котором располагается четырехпозиционный резцедержатель 7. К продольному суппорту крепят фартук 11, в котором смонтированы механизмы подачи. В пиноли задней бабки 9 устанавливают задний центр или инструмент для обработки отверстий (сверла, зенкеры).

6.2.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления заготовок

Основным принципом классификации токарных резцов является их технологическое назначение. Различают резцы (рис. 6.3): *проходные прямые* и *упорные* для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей, *расточные проходные* и *упорные* - для растачивания сквозных и глухих отверстий, *отрезные* - для отрезания заготовок, *резьбовые* - для нарезания наружных и внутренних резьб, *фасонные* - для обтачивания фасонных поверхностей, *прорезные* - для протачивания кольцевых канавок, *галтельные* - для обтачивания переходных поверхностей между ступенями валов по радиусу, *подрезные* - для обтачивания плоских торцевых поверхностей.

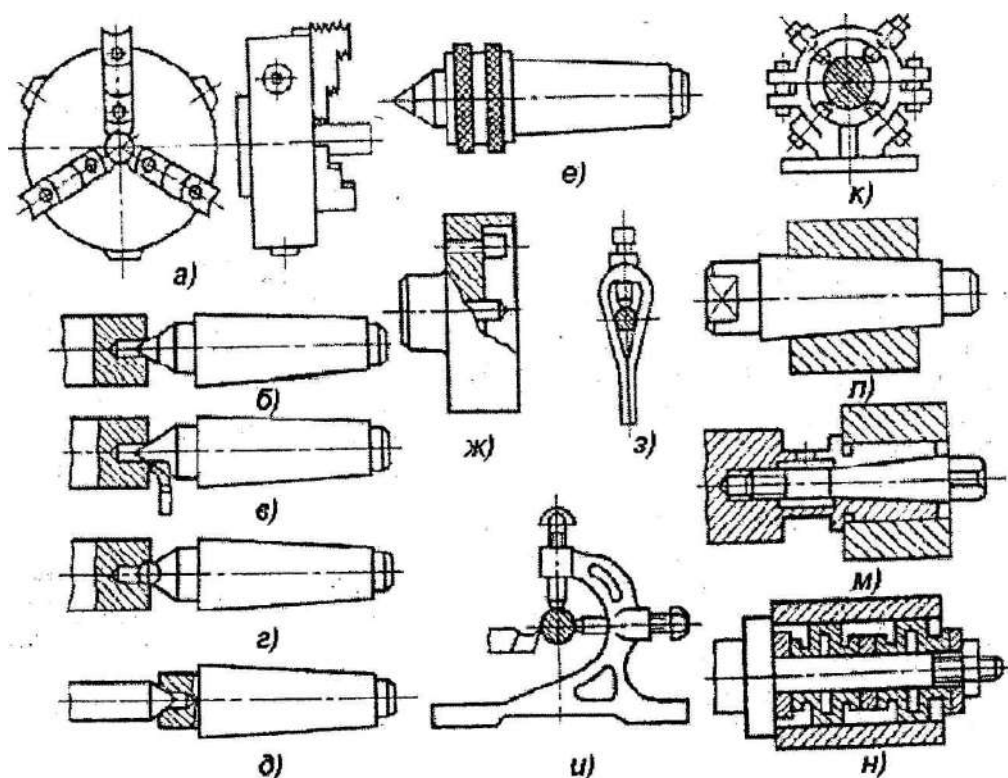


Рис. 6.3. Приспособления для закрепления заготовок на токарных станках

Для закрепления заготовок на токарно-винторезных станках широко используют *трехкулачковые самоцентрирующие патроны* (рис. 4.12, а), их применяют для закрепления заготовок при отношении их длины к диаметру $l/d > 4$. При отношении $l/d = 4-10$ заготовку устанавливают в центрах, для этого заго-

товку центруют, т. е. сверлят *центровые Отверстия* с торцов вала специальными центровочными сверлами. *Центры* бывают *упорные* (рис. 6.3, б), *срезанные* (рис. 6.3, в), *шариковые* (рис. 6.3, г). *Срезанные центры* применяют при подрезании торцов заготовки, когда подрезной резец должен подойти близко к оси вращения заготовки. *Шариковые центры* используют при обтачивании конических поверхностей сдвигом задней бабки в поперечном направлении, а *обратные центры* (рис. 6.3, д) - при обработке заготовок небольших диаметров. *Вращающиеся центры* (рис. 6.3, е) применяют при большой глубине резания, когда возникают значительные силы резания.

Поводковый патрон (рис. 6.3, ж) и хомутик (рис. 6.3, з) используют для передачи крутящего момента от шпинделя станка на заготовку, закрепленную в центрах.

При отношении $1/\alpha > 10$ для уменьшения деформации заготовок применяют люнеты. *Подвижный открытый люнет* (рис. 6.3, и) устанавливают на продольном суппорте станка, *неподвижный закрытый люнет* (рис. 6.3, к) закрепляют на станине. Силы, действующие со стороны инструмента на заготовку, воспринимаются опорами люнетов, что повышает точность обработки.

Для закрепления заготовок типа втулок, колец, стаканов применяются *оправки: конические, цанговые, с гофрированными втулками* (рис. 6.3, л, м, н). На токарно-револьверных станках, полуавтоматах и автоматах для закрепления заготовок-прутков используют *цанговые патроны*.

6.2.4. Основные виды токарных работ

Схемы основных видов обработки поверхностей, приведенные на рис. 6.4, являются типовыми, так как их можно реализовать на универсальных токарных станках, полуавтоматах, автоматах и станках с ЧПУ.

Наружные цилиндрические поверхности обтачивают прямыми (рис. 6.4, б) или упорными ($\alpha=90^\circ$) проходными резцами. Использование упорных резцов приводит к нулю радиальную составляющую силы резания R_y , что снижает деформацию заготовок в процессе обработки и повышает их точность.

Наружные (рис. 6.4, в) и *внутренние резьбы* нарезают резьбовыми резцами.

Точение длинных пологих конусов выполняют, смещая в поперечном направлении корпус задней бабки относительно ее основания (рис. 6.4, г) или используя конусную линейку.

Сквозные отверстия растачивают проходными расточными резцами (рис. 6.4, д), *глухие* - упорными (рис. 6.4, е).

С поперечным движением подачи на токарных станках *протачивают кольцевые канавки* (рис. 6.4, з) прорезными резцами, *фасонные поверхности* (рис. 6.4, и) - фасонными резцами, *короткие конические поверхности - фаски* (рис. 6.4, к) - широкими резцами. *Отрезание деталей* от заготовки (рис. 6.4, л) выполняют отрезными резцами с наклонной режущей кромкой, что позволяет

получить у готовой детали торец без остаточного заусенца. *Подрезание торцов* (рис. 6.4, н) выполняют подрезанными резцами.

Обработку отверстий производят сверлами, зенкерами, развертками (рис. 6.4, м). Обработку ведут с продольным движением подачи режущего инструмента. *Обтачивание наружных и растачивание внутренних конических поверхностей средней длины* (рис. 6.4, ж, о) производят с наклонным движением подачи, при повороте каретки верхнего суппорта.

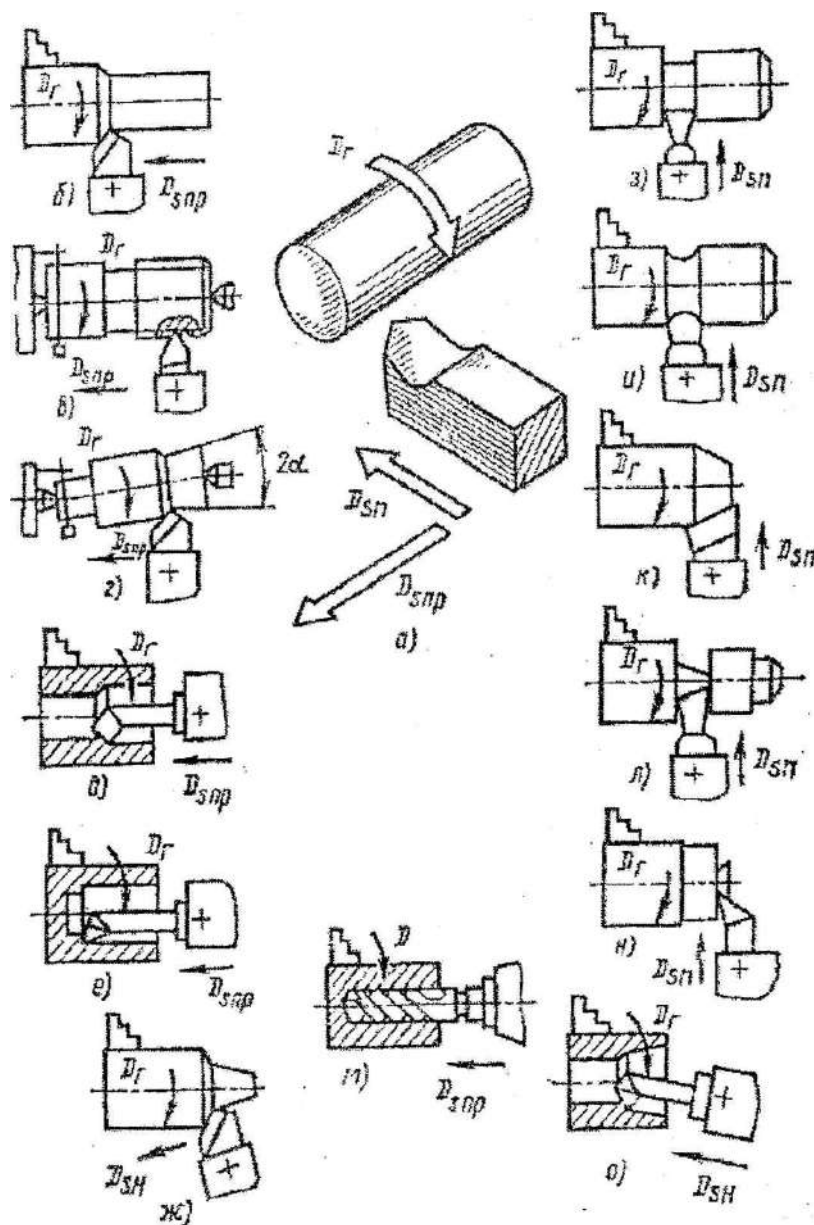


Рис. 6.4. Схема обработки заготовок на токарных станках

6.3. Обработка заготовок на сверлильных и расточных станках

6.3.1. Характеристика метода сверления

Основное назначение *сверлильных станков* - обработка отверстий в заготовках. *Сверлением* получают сквозные и несквозные (глухие) отверстия в сплошном материале и обрабатывают предварительно полученные отверстия в целях увеличения их размеров, повышения точности и снижения шероховатости поверхности.

Сверление осуществляют при сочетании вращательного движения инструмента вокруг оси - главного движения резания и его поступательного движения вдоль оси - движения подачи. Оба движения на сверлильном станке, как правило, сообщают инструменту. Процесс резания при сверлении протекает в более сложных условиях, чем при точении, так как затруднены отвод стружки и подвод охлаждающей жидкости к режущим кромкам инструмента. Кроме того, скорость резания изменяется вдоль режущей кромки от максимального значения на периферии сверла до нулевого значения у центра.

6.3.2. Типы сверлильных станков

Вертикально-сверлильные станки (рис. 6.5, а) предназначены для обработки заготовок небольших размеров, максимальный диаметр сверления - 100 мм. Широкая универсальность и возможность автоматизации способствует их использованию во всех отраслях промышленности. На *горизонтально-сверлильных станках* получают глубокие отверстия специальными сверлами.

Радиально-сверлильные станки (рис. 6.5, б) используются для обработки отверстий в крупногабаритных заготовках. Эти станки универсальные их применяют в единичном и мелкосерийном производстве. *Вертикально-сверлильные* (рис. 6.5, в) и *радиально-сверлильные станки с ЧПУ* широко используются в единичном и мелкосерийном производстве. Простота переналадки позволяет выполнять на них по автоматическому циклу обработку различных видов заготовок. На одношпиндельных сверлильных полуавтоматах и автоматах циклы обработки отверстий полностью автоматизированы. Они характеризуются высокой производительностью и используются в крупносерийном и массовом производстве.

Конструкции сверлильных станков различных типов имеют много общего. На фундаментной плите 1 *вертикально-сверлильного станка* (рис. 6.5, а) смонтирована колонна 2. На ее вертикальных направляющих устанавливают и закрепляют стол 3, на котором помещают заготовку. Инструмент закрепляют в шпинделе 4. В сверлильной головке 5, смонтированной на колонне, размещают коробки скоростей и подач. Инструмент вместе со шпинделем совершает вращательное главное движение резания и вертикальное движение подачи. Взаимное положение стола и сверлильной головки

устанавливают в соответствии с размерами заготовки и фиксируют перед началом обработки. Для обработки каждого последующего отверстия заготовку необходимо переустановить так, чтобы ось инструмента совпала с осью обраба-

тываемого отверстия.

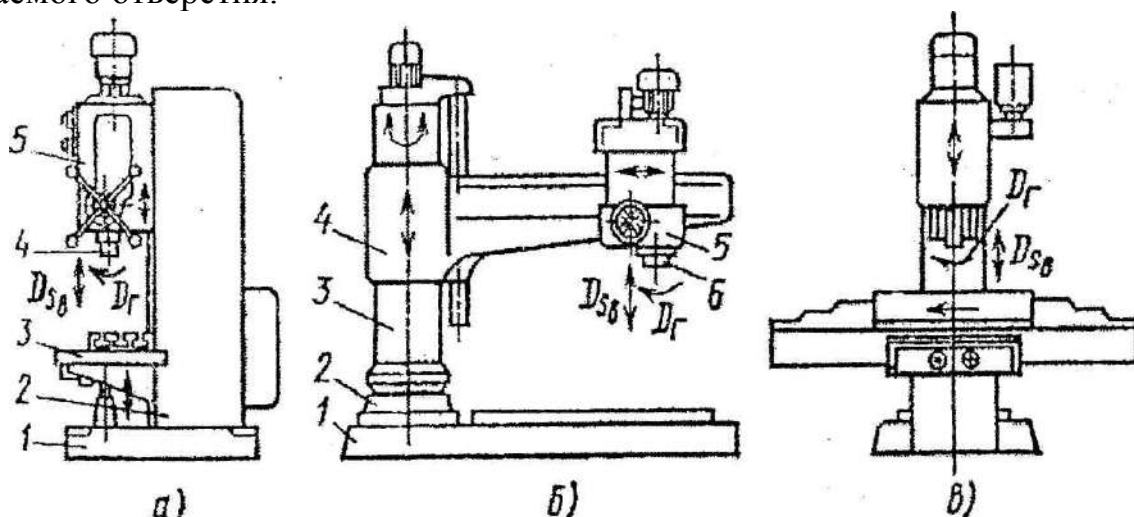


Рис. 6.5. Основные типы сверлильных станков

На неподвижной колонне 2 *радиально-сверлильного станка* (рис. 6.5, б) смонтирована поворотная колонна 3. По ней в вертикальном направлении перемещается и устанавливается в нужном положении траверса 4. По ее горизонтальным направляющим перемещается сверлильная головка 5, в которой расположены коробки скоростей и подачи. Шпиндель 6 с закрепленным инструментом совершает вращательное главное движение резания и вертикальное движение подачи. Поворотом траверсы и перемещением сверлильной головки осуществляют совмещение осей шпинделя и обрабатываемого отверстия при неподвижной заготовке.

6.3.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления инструмента и заготовок

Для обработки заготовок на сверлильных станках применяют сверла, зенкеры, развертки, метчики и т. д. *Сверла* по конструкции делят на спиральные, центровочные и специальные. Наиболее распространены спиральные сверла. *Спиральное сверло* (рис. 4.15) имеет рабочую часть 11, шейку 12, хвостовик 13 и лапку 14. Хвостовик служит для закрепления сверла на станке, лапка предохраняет хвостовик при выбивании сверла из шпинделя станка. Рабочая часть имеет режущую 15 и направляющую 16 части с винтовыми канавками. На рабочей части сверла имеются две главные режущие кромки, поперечная режущая кромка (перемычка), две вспомогательные режущие кромки. Вдоль винтовых канавок расположены две узкие ленточки, обеспечивающие направление сверла при резании.

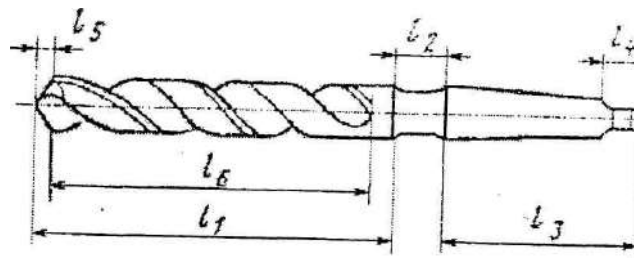


Рис. 6.6. Элементы спирального сверла с коническим хвостовиком

Зенкеры используют для обработки отверстий, полученных сверлением литьем или ковкой. Зенкеры делят на цилиндрические (рис 6.7, а) и конические. В отличие от сверл, зенкеры снабжены тремя или четырьмя главными режущими кромками и не имеют поперечной режущей

Зенковки (рис. 6.7, в) *цековки* (рис. 6.7, б, г) - многолезвийные режущие инструменты для обработки конических, цилиндрических и торцовых входных участков отверстий.

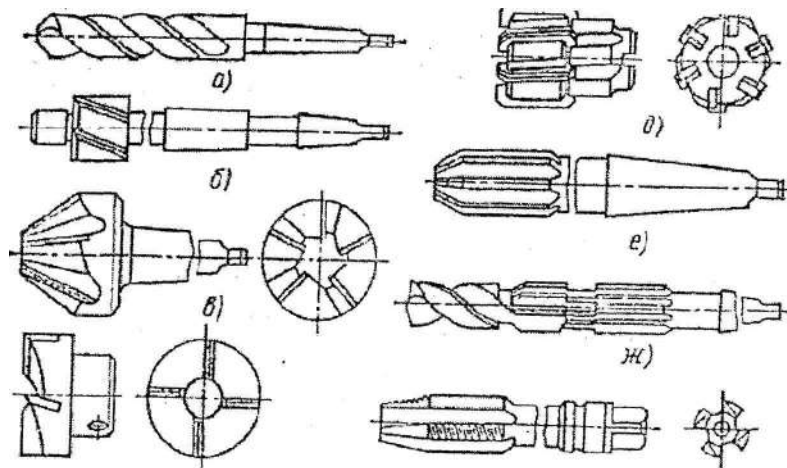


Рис. 6.7. Режущие инструменты, применяемые на сверлильных станках

Развертки - многолезвийный инструмент для окончательной обработки отверстий. Развертки имеют 6-12 главных режущих кромок расположенных на режущей части с направляющим конусом. Различают развертки цилиндрические (рис. 6.7, д, е) и конические, цельные с хвостовиком и насадные.

Комбинированный инструмент (рис. 6.7, ж) применяют для повышения производительности в крупносерийном и массовом производстве. *Метчики* (рис. 6.7, з) предназначены для нарезания внутренней резьбы и представляют собой винт, на котором прорезаны прямые или винтовые канавки, в результате чего образуются режущие кромки. Режущие инструменты закрепляют в шпинделе станка непосредственно с помощью конического хвостовика или с применением *переходных конических втулок*. Инструменты небольших диаметров с цилиндрическим хвостовиком закрепляют в различных по конструкции *патронах*.

На станках с инструментальными магазинами инструмент крепят в специ-

альных унифицированных втулках (*оправках*). Заготовки на сверлильных станках закрепляют с помощью универсальных и специальных приспособлений. Универсальные приспособления применяют в единичном и мелкосерийном производстве. К ним относят *машинные тиски, прижимные планки, призмы со трубцинами, трехкулачковые патроны* и т. д. Специальные приспособления применяют в крупносерийном и массовом производстве для быстрой и точной установки заготовки относительно инструмента. Каждое приспособление, как правило, может быть использовано только для одной заготовки. К таким приспособлениям относят *кондукторы*. Они имеют направляющие втулки, обеспечивающие заданное положение инструмента относительно заготовки.

6.3.4. Основные виды работ, выполняемых на сверлильных станках

Схемы обработки заготовок приведены на рис. 6.8. *Сверлением* (рис. 6.8, а) получают сквозные и глухие цилиндрические поверхности. *Рассверливание* спиральным сверлом (рис. 6.8, б) производят для увеличения диаметра отверстия. Диаметр отверстия под рассверливание выбирают так, чтобы поперечная режущая кромка в работе не участвовала. *Зенкерование* (рис. 6.8, в) также применяют для увеличения диаметра отверстия. В отличие от рассверливания, зенкерование обеспечивает большую производительность и точность обработки.

Развертыванием (рис. 6.8, г) получают высокую точность и малую шероховатость обработанной поверхности. Развертывают цилиндрические и конические поверхности. Для развертывания конических отверстий цилиндрические отверстия в заготовке сначала обрабатывают коническим ступенчатым зенкером (рис. 6.8, м), затем конической разверткой со стружкоразделительными канавками (рис. 6.8, н) и окончательно - конической разверткой с гладкими режущими кромками (рис. 6.8, о).

Зенкованием обрабатывают конические углубления под головки винтов и болтов (рис. 6.8, е). Некоторые зенковки имеют направляющую часть, которая обеспечивает соосность конического углубления и основного отверстия. *Цекованием* обрабатывают цилиндрические углубления (рис. 6.8, д) и торцовые плоскости (рис. 6.8, ж, з), которые являются опорными поверхностями головок болтов, винтов, гаек. Перпендикулярность торца по отношению к основному отверстию достигается наличием у цельной цековки (рис. 6.8, д, ж) и упластинчатого резца (рис. 6.8, з) направляющей части. *Нарезание резьбы* производят метчиком (рис. 6.8, к). Комбинированным инструментом получают *сложные поверхности* (рис. 6.8, и, л).

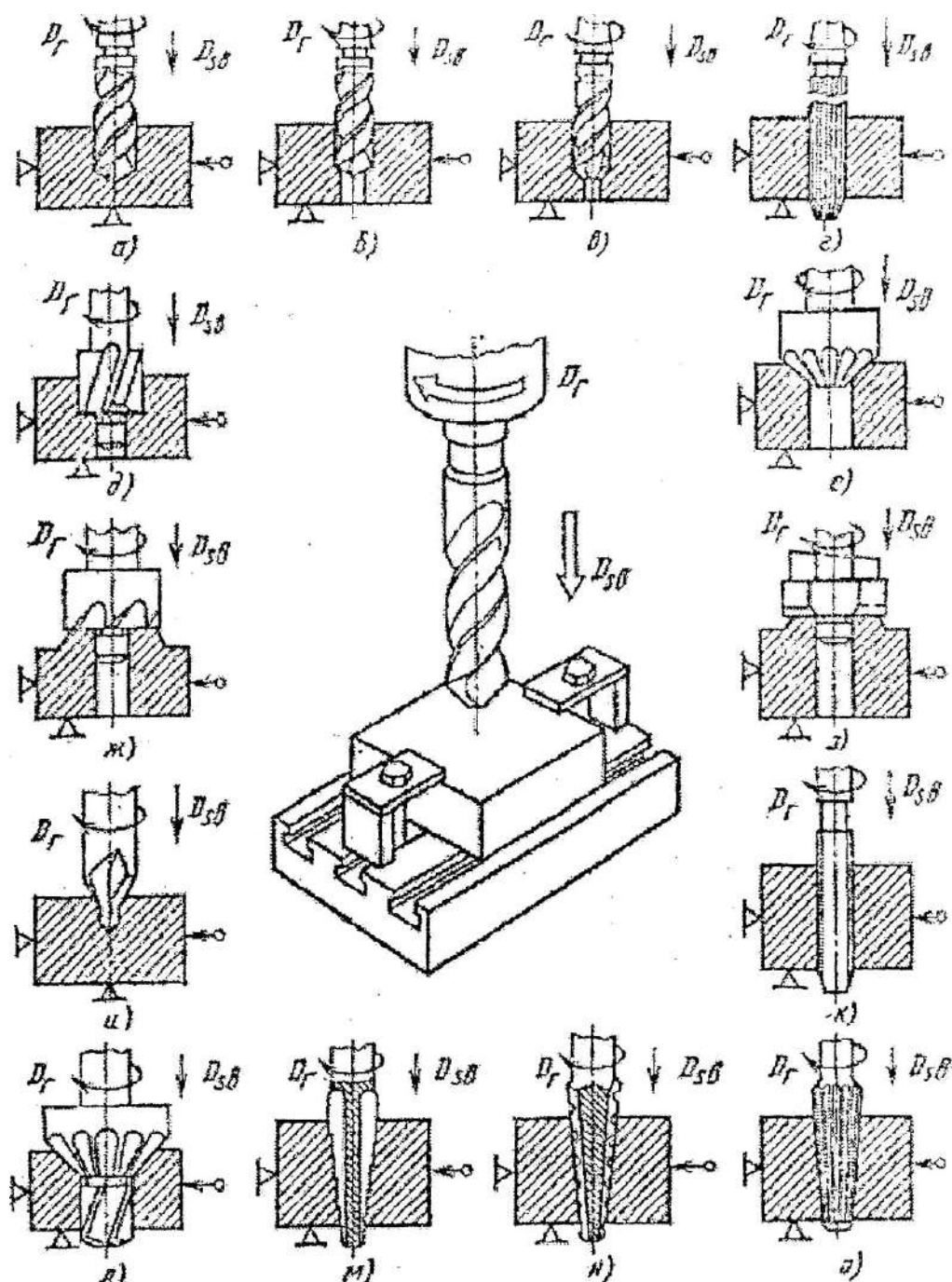


Рис. 6.8. Схемы обработки заготовок на сверлильных станках

6.3.5. Назначение и типы расточных станков

Формообразование поверхностей на *расточных станках* выполняется за счет сочетания главного вращательного движения резания, сообщаемого расточному резцу или другому режущему инструменту, и движения подачи, сообщаемого инструменту или заготовке. Направление движения подачи может быть продольным, поперечным, радиальным и вертикальным - в зависимости от характера обрабатываемой поверхности.

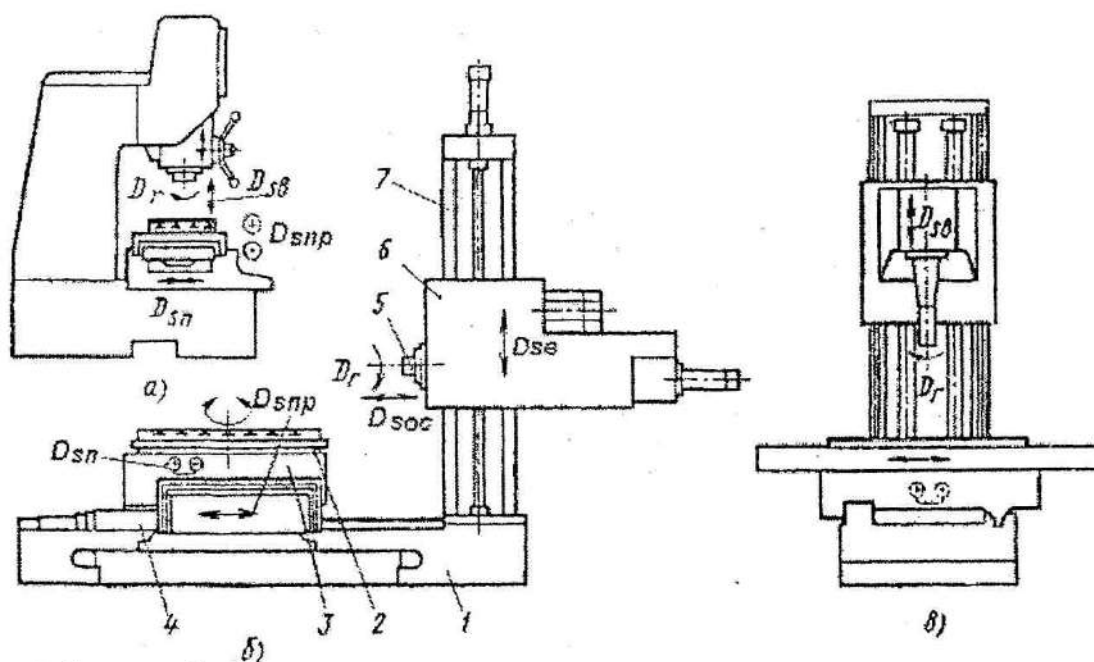


Рис. 6.9. Основные типы расточных станков

Выпускаются следующие типы расточных станков: координатно-расточные, горизонтально-расточные и алмазно-расточные (рис. 6.9). *Координатно-расточные станки* (рис. 6.9, а) бывают одностоечные и двухстоечные и предназначены - для обработки отверстий с высокой точностью формы, размеров и взаимного расположения. Обработку производят в специальных термоконстантных помещениях, в которых поддерживается температура $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Горизонтально-расточные станки (рис. 6.9, б) предназначены для обработки, как правило, заготовок корпусных деталей. Координатно- и горизонтально-расточные станки выпускаются с различными системами ЧПУ и применяются в мелкосерийном производстве.

На *алмазно-расточных станках* (рис. 6.9, в) обрабатывают с высокой точностью цилиндрические отверстия в корпусных заготовках небольших размеров, обработка ведется по автоматическому циклу. Эти станки применяют в крупносерийном и массовом производстве. Наиболее распространены *горизонтально-расточные станки* (рис. 6.9, б). На станине 1 неподвижно закреплена передняя стойка 7. По ее вертикальным направляющим перемещается шпиндельная бабка 6 со шпинделем 5. Стол 4 перемещается по продольным направляющим станины. В его поперечных направляющих смонтированы салазки 3, на которых установлен поворотный стол 2.

Вращательное главное движение O_m совершает инструмент, установленный в шпинделе. Движение подачи может совершать как инструмент - осевое перемещение шпинделя D_{soc} , вертикальное перемещение D_{sb} шпиндельной бабки, так и заготовка - продольное перемещение $D_{спр}$ стола или поперечное перемещение $D_{спр}$ салазков. Поворотный стол позволяет обрабатывать заготовку с разных сторон без переустановки ее на столе.

6.3.6. Режущий инструмент и схемы обработки заготовок на расточных станках

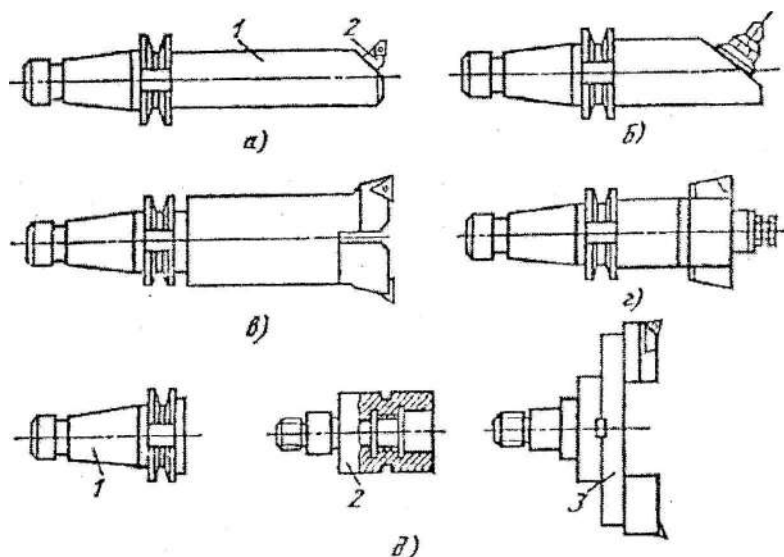


Рис. 6.10. Режущие инструменты, применяемые на расточных станках

Наибольшее распространение имеет расточной инструмент, выполненный в виде *консольной расточной оправки* 1 с закрепленным в ней стержневым резцом 2 (рис. 6.10, а).

Установку резца на заданный диаметр отверстия выполняют регулированием его вылета. Настройка инструмента облегчается при использовании *резцов-вставок* с микрометрическим регулированием размера (рис. 6.10, б). *Расточными головками* называют расточные оправки, у которых резцы установлены на диаметрально противоположных сторонах (рис. 6.10, в, г). Для подрезки применяют резцы, режущая часть которых выполнена с углом в плане $\gamma=90^\circ$ (рис. 6.10, г).

На станках с ЧПУ обычно применяют *сборный расточной инструмент*, который включает в себя унифицированный хвостовик 1 (рис. 6.10, д), удлинительный элемент 2 и головку 3.

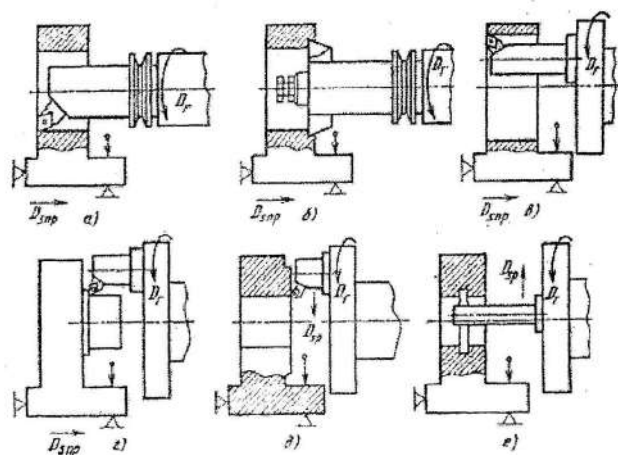


Рис. 6.11. Схемы обработки заготовок на расточных станках

Растачивание цилиндрических отверстий производят расточными проходными резцами (рис. 6.11, а). Подрезание торцов небольших размеров выполняют инструментом для подрезных работ (рис. 6.11, б). Внутренние цилиндрические поверхности очень большого диаметра растачивают расточным резцом, установленным на планшайбе станка в оправке (рис. 6.11, в). Главное движение совершает инструмент, вращающийся вместе с планшайбой. Аналогичным образом обрабатывают короткие наружные цилиндрические поверхности (рис. 6.11, г).

Наружные торцовые поверхности, внутренние канавки и другие аналогичные элементы деталей обрабатывают соответствующими резцами, закрепленными в радиальном суппорте. Резец, вращаясь, перемещается с радиальным движением подачи (рис. 4.20, д, е).

На координатно-расточных станках можно обрабатывать отверстия с очень высокой точностью и обеспечивать точное расстояние между отверстиями, так как настройка выполняется с помощью специальных оптических устройств.

Алмазно-расточные станки имеют высокие точность и жесткость, растачивание на таких станках обеспечивает высокое качество поверхности.

6.4. Обработка заготовок на фрезерных станках

6.4.1. Характеристика метода фрезерования

Фрезерование - это высокопроизводительный способ формообразования поверхностей деталей многолезвийным режущим инструментом - фрезой. Для фрезерования характерно непрерывное вращательное главное движение инструмента 2 и поступательное движение подачи заготовки 1 (рис. 4.31). В некоторых случаях заготовка совершает круговое движение подачи (карусельно-фрезерные и барабанио-фрезерные станки).

Особенность процесса фрезерования - прерывистость резания каждым зубом фрезы. Зуб фрезы выполняет работу резания только на некоторой части оборота, а затем продолжает движение, не касаясь заготовки до следующего врезания.

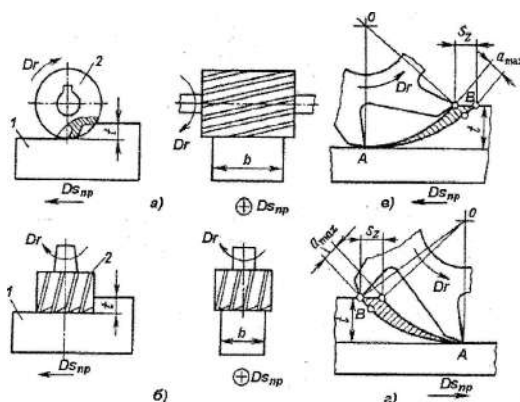


Рис. 6.12. Схемы фрезерования торцовой и цилиндрической фрезами

Цилиндрическое (рис. 6.12, а) и *торцовое* (рис. 6.12, б) фрезерование зависят от направления вращения фрезы и направления подачи, осуществляют двумя способами: 1) против движения подачи (*встречное фрезерование*), когда направление движения подачи противоположно направлению главного движения резания (рис. 6.12, в); 2) по движению подачи (*попутное фрезерование*), когда направление движения подачи и главного движения резания совпадают (рис. 6.12, г).

При встречном фрезеровании нагрузка на зуб фрезы возрастает от нуля в точке А до максимума в точке В, при этом сила, действующая на заготовку, стремится оторвать ее от стола, что приводит к вибрациям и увеличению шероховатости обработанной поверхности. Преимуществом такого фрезерования является работа зубьев фрезы "из-под корки", т. е. зуб подходит к твердому поверхностному слою снизу. Недостатком является начальное скольжение зуба по наклепанной поверхности, что вызывает повышенный износ фрезы.

При попутном фрезеровании зуб сразу начинает срезать слой максимальной толщины атак и испытывает максимальную нагрузку, это исключает начальное проскальзывание, уменьшает износ фрезы и шероховатость обработанной поверхности. Сила, действующая на заготовку, прижимает ее к столу, что уменьшает вибрации.

6.4.2. Типы фрезерных станков

Горизонтально- (рис. 6.13, а) и *вертикально-фрезерные* (рис. 6.13, б) станки относят к универсальному оборудованию. Их выпускают как с ручным управлением, так и с ЧПУ, используют для выполнения широкого круга фрезерных работ на заготовках небольших размеров в единичном и мелкосерийном производствах.

В станине 1 универсального горизонтально-фрезерного станка с ЧПУ (рис. 6.13, а) смонтирован шпиндель 2, в котором закрепляют инструменты. На направляющих хобота 3 устанавливают подвески 4, являющиеся дополнительными опорами для длинной оправки с инструментом. Фреза со шпинделем совершает вращательное главное движение D_r . Заготовку закрепляют на столе 5. Вместе со столом она совершает продольное $D_{спр}$, с салазками 6 - поперечное $D_{сп}$ и с консолью 7 - вертикальное $D_{св}$ движения подачи.

Универсальный вертикально-фрезерный станок с ЧПУ (рис. 6.13, б) отличается вертикальным расположением оси шпинделя 1 и тем, что шпиндельная головка 2 может поворачиваться в плоскости продольного движения подачи.

Продольно-фрезерные станки могут быть одно- и двухстоечными. На двухстоечных продольно-фрезерных станках выполняют обработку заготовок крупных корпусных деталей сразу несколькими фрезами. По продольным направляющим станины 1 (рис. 6.13, в) перемещается стол 2, на котором устанавливают одну или несколько заготовок. Левую и правую шпиндельные бабки 3 предварительно устанавливают в нужном положении на левой и правой стой-

ках 4, а вертикальные шпиндельные бабки 5 - на траверсе 6. Траверса может перемещаться по вертикальным направляющим стоек 4. Для жесткости стойки соединены порталом 7. Конструкции шпиндельных бабок позволяют всем шпинделям 8 совершать главное движение D_r с различными скоростями.

Карусельно-фрезерные станки (рис. 6.13, г) применяют в массовом производстве для обработки заготовок небольших размеров. На станине 1 закреплена стойка 2, по вертикальным направляющим которой перемещается фрезерная головка 3. Она имеет два шпинделя 4. По поперечным направляющим станины перемещаются салазки 5, несущие круглый стол 6, который вращается относительно вертикальной оси (круговая подача $D_{кр}$).

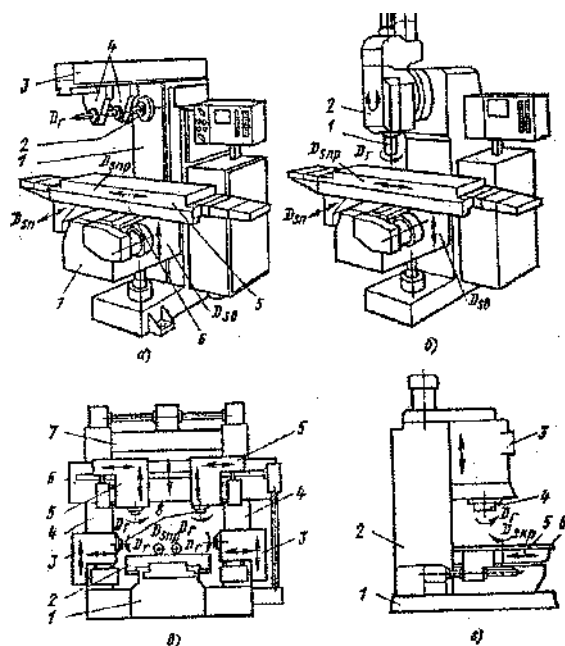


Рис. 6.13. Основные типы фрезерных станков

6.4.3. Режущий инструмент и технологическая оснастка фрезерных станков

При фрезеровании применяют фрезы различных типов: цилиндрические (рис. 4.33, а), торцовые (рис. 6.14, б, з) дисковые (рис. 6.14, в), концевые (рис. 6.14, г), угловые (рис. 6.14, д), шпоночные (рис. 6.14, е), фасонные (рис. 6.14, ж).

Фрезы бывают цельными или сборными. Режущие кромки могут быть прямыми или винтовыми, а зубья - остроконечными (рис. 6.14, и) или затылованными (рис. 6.14, к).

Цельные фрезы изготавливают из инструментальных сталей. У *сборных фрез* зубья (ножи) выполняют из быстрорежущих сталей или оснащают пластинами из твердых сплавов и закрепляют в корпусе фрезы пайкой или механически.

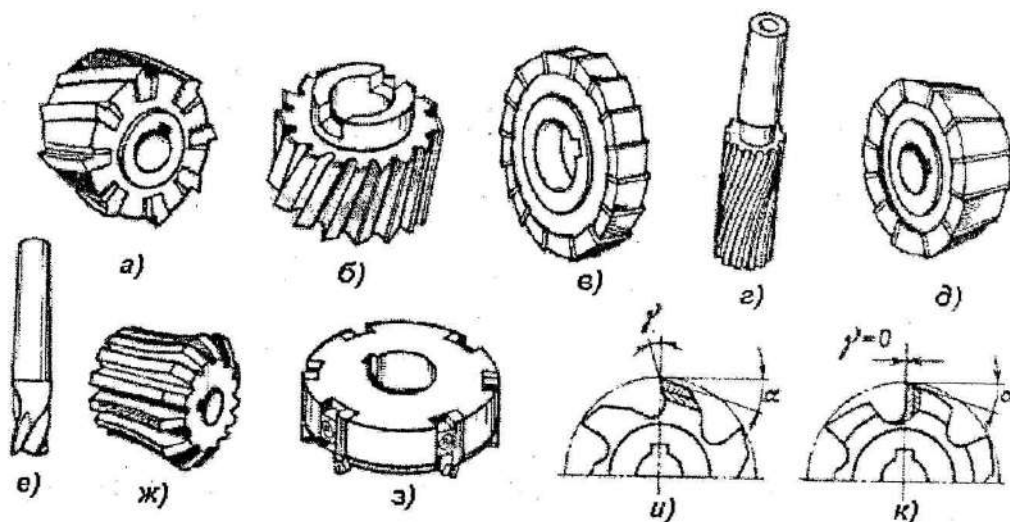


Рис. 6.14. Типы фрез

Способ закрепления фрезы на станке зависит от ее конструкции. Фрезы с осевым отверстием называют *насадными* и закрепляют с помощью центровых или концевых оправок. Фрезы, имеющие конический или цилиндрический хвостовик, называют *хвостовыми*. Фрезы с коническим хвостовиком закрепляют или непосредственно в коническом отверстии шпинделя или через *переходные втулки*. Для закрепления фрез с цилиндрическим хвостовиком используют различные по конструкции *патроны*, устанавливаемые в шпинделе станка как концевые оправки. Для закрепления заготовок на фрезерных станках применяют универсальные и специальные приспособления. К универсальным относят *машинные тиски, прихваты, угольники, призмы*. При обработке большого числа одинаковых заготовок используют специальные приспособления, пригодные только для закрепления этих заготовок на данном станке.

Важной принадлежностью фрезерных станков являются *делительные головки*, которые служат для периодического поворота заготовок на требуемый угол и для непрерывного их вращения при фрезеровании винтовых канавок.

6.4.4. Схемы обработки заготовок на фрезерных станках

Вертикальные плоскости на горизонтально-фрезерном станке (рис. 6.15, а) фрезеруют торцовыми насадными фрезами, на вертикально-фрезерном (рис. 6.15, г) - концевыми фрезами. *Горизонтальные плоскости* обрабатывают цилиндрическими фрезами на горизонтально-фрезерном станке (рис. 6.15, б) и торцовыми насадными фрезами - на вертикально-фрезерном станке (рис. 6.15, в). *Наклонные плоскости небольшой ширины* получают на горизонтально-фрезерном станке одноугловой фрезой (рис. 6.15, д). *Широкие наклонные плоскости* обрабатывают на вертикально-фрезерном станке с поворотом шпиндельной головки (рис. 6.15, е) торцовой насадкой или концевой фрезами. *Уступы и прямоугольные пазы* на горизонтально-фрезерном станке обрабатывают соответ-

ственно дисковыми двусторонними (рис. 6.15, ж) и трехсторонними (рис. 6.15, и) фрезами, а на вертикально-фрезерном - концевыми (рис. 6.15, з, к) фрезами.

Фасонные поверхности с криволинейной образующей и прямолинейной направляющей обрабатывают фасонными фрезами на горизонтально-фрезерном станке (рис. 6.15, л). *Пазы типа "ласточкин хвост"* и *Т-образные* обрабатывают на вертикально-фрезерных станках. Сначала фрезеруют прямоугольный паз концевой фрезой, а затем концевой одноугловой (рис. 6.15, м) фрезой или фрезой для Т-образных пазов (рис. 6.15, р). На горизонтально-фрезерном станке *шпоночные пазы* фрезеруют дисковыми фрезами (рис. 6.15, о), а на вертикально-фрезерном - концевыми (рис. 6.15, п). *Одновременную обработку нескольких поверхностей* на горизонтально-фрезерном станке производят набором фрез (рис. 6.15, н). Те же работы выполняются и на других типах фрезерных станков.

6.5. Обработка заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках

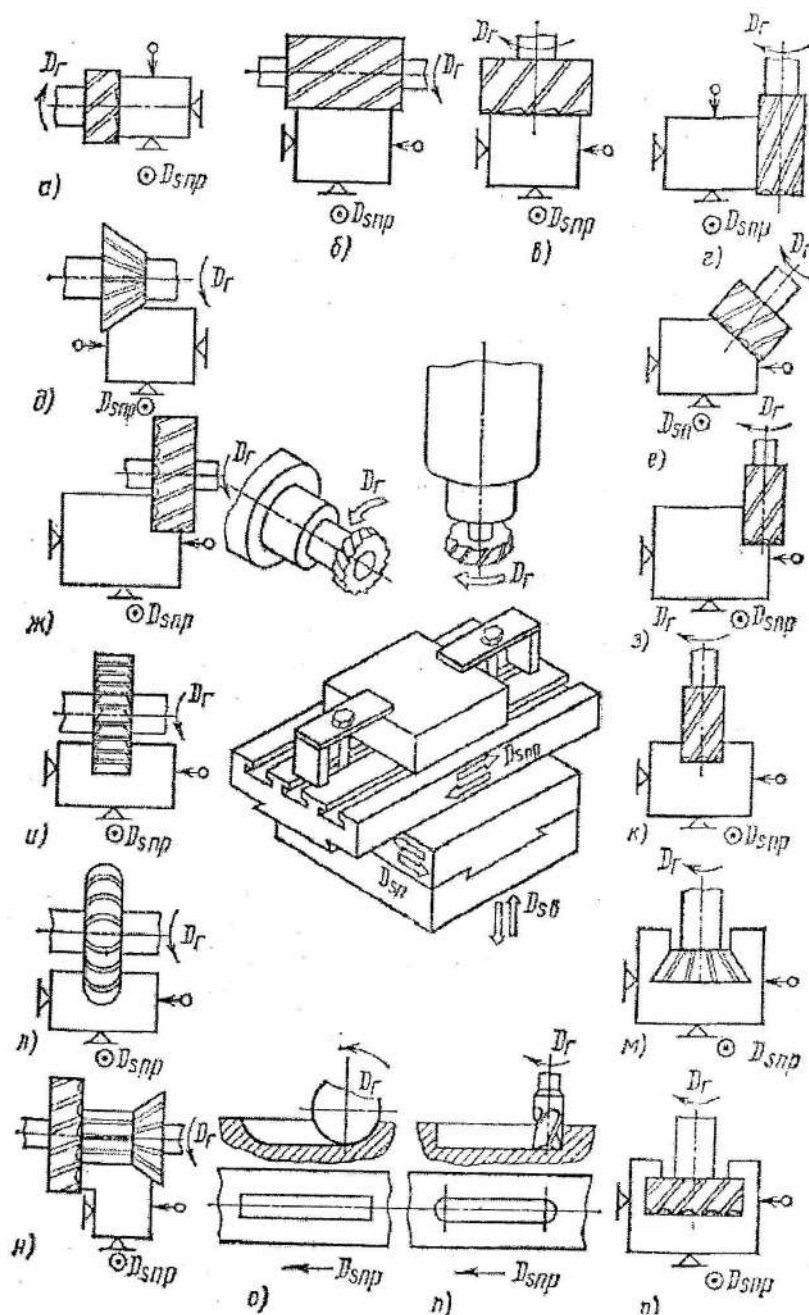
6.5.1. Характеристика методов строгания, долбления и протягивания

Формообразование поверхностей заготовок *строганием* на поперечно-строгальных станках и *долблением* характеризуется наличием двух движений: возвратно-поступательного движения резца (главное движение резания) и прерывистого прямолинейного движения подачи, направленного перпендикулярно к главному движению. На продольно-строгальных станках главное движение резания D_r сообщается столу с заготовкой, а движение подачи - суппорту с резцом. Процесс резания при строгании и долблении прерывистый, и удаление слоя металла происходит только при прямом рабочем ходе. Во время обратного (вспомогательного) хода резец работу не производит.

Прерывистый процесс резания способствует охлаждению инструмента во время обработки, что в большинстве случаев исключает применение смазочно-охлаждающих жидкостей. Прерывистый процесс резания приводит к значительным динамическим нагрузкам на режущий инструмент, поэтому строгание и долбление осуществляют на умеренных скоростях резания.

Протягивание - процесс обработки внутренних (цилиндрических, многогранных, шлицевых и др.) и наружных (плоских или фасонных) поверхностей заготовок с помощью круглых, фасонных или плоских протяжек. Поступательное главное движение резания относительно неподвижной заготовки сообщается *протяжке* - многолезвийному режущему инструменту. Движение подачи при протягивании как самостоятельное движение инструмента или заготовки отсутствует. За величину подачи принимают подъем на зуб, т. е. разность размеров по высоте двух соседних зубьев протяжки. Величина подачи является одновременно и глубиной резания. Величина подачи в основном зависит от обрабатываемого материала, конструкции протяжки и жесткости заготовки.

Рис. 6.15. Схемы обработки заготовок на фрезерных станках



6.5.2. Строгальные, долбежные и протяжные станки

Поперечно-строгальный станок (рис. 6.16, а) состоит из основания 1, станины 2, траверсы 3, которая движется по вертикальным направляющим станины, и стола 4, установленного на траверсе. По направляющим станины перемещается ползун 7. Резец закрепляется в откидном резцедержателе, смонтированном на вертикальном суппорте 6. Движение подачи совершается во время холостых ходов ползуна. *Продольно-строгальные станки* (рис. 6.16, б) бывают одно- и двухстоечные. Станина 1 снабжена направляющими, по ним стол 2 совершает возвратно-поступательное главное движение резания, которое задает-

ся ему электродвигателем 13 через коробку скоростей 12. Станок имеет левую 3 и правую 8 стойки, скрепленные поперечиной 7. По направляющим стоек передвигается траверса 5, на которой установлены два верхних суппорта 6 и 9. Суппортам через коробку подач 10 задается горизонтальная (поперечная) подача. Боковые суппорты 4, 11 имеют горизонтальную (поперечную) и вертикальную подачи.

Долбежный станок (рис. 6.16, в) имеет станину 1 с направляющими для салазок 2, 3 стола 4. По направляющим стойки 7 перемещается в вертикальном направлении ползун 6 с резцедержателем 5. Главное движение резания совершает ползун, а движения подачи (их три) - стол станка. Круговая подача задается червячной парой, а продольная и поперечная - винтовыми парами.

Горизонтально-протяжной станок для внутреннего протягивания (рис. 6.16, г) состоит из станины 1, насосной станции 2, гидроцилиндра 3, каретки 4, опорного кронштейна 5 и корыта 6. Протяжку вставляют в отверстие заготовки и закрепляют в патроне каретки 4. Каретка с протяжкой получают поступательное главное движение резания от штока поршня гидроцилиндра 3. Заготовка при протягивании опирается о поверхность кронштейна 5. После окончания протягивания заготовка падает в корыто 6, протяжка извлекается из каретки, которая возвращается в исходное положение и цикл обработки повторяется.

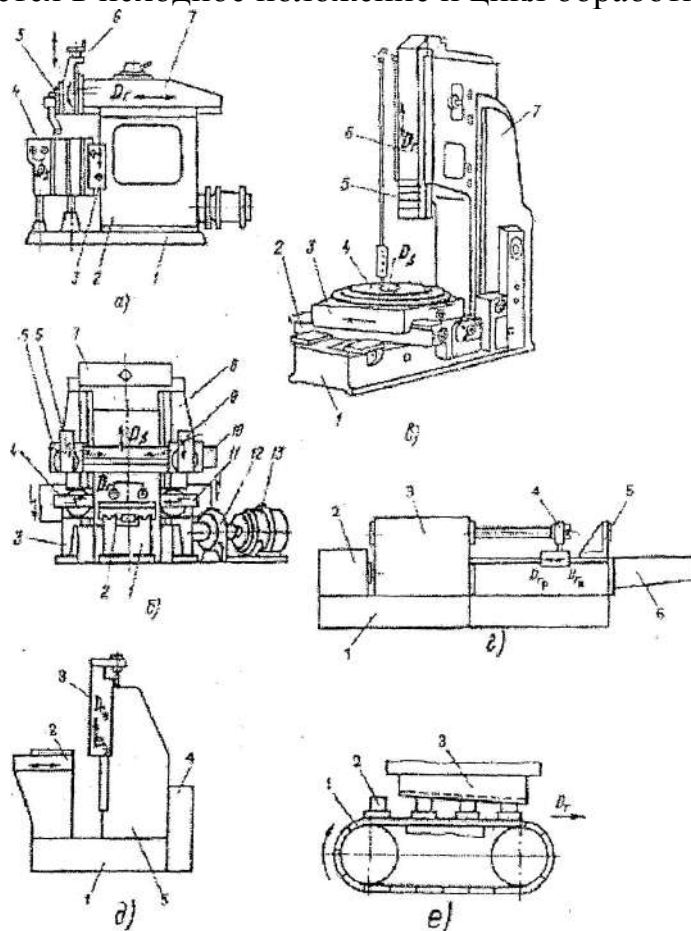


Рис. 6.16. Строгальные, долбежные и протяжные станки

Вертикально-протяжной станок для наружного протягивания (рис. 6.16, д) состоит из основания 1, станины 5, насосной станции 4, каретки 3, стола 2.

Заготовку устанавливают на столе станка. Протяжку закрепляют в каретке и от гидропривода сообщают ей вертикальное главное движение резания. Протяжка, опускаясь, обрабатывает заготовку.

Протяжные станки непрерывной обработки (рис. 6.16, е) являются станками высокой производительности. Заготовки 2 устанавливают в приспособлениях непрерывно движущейся тяговой цепи 1 и задают им поступательное главное движение резания относительно неподвижной протяжки 3.

6.5.3. Режущий инструмент для строгания, долбления и протягивания

В зависимости от назначения различают следующие типы **строгальных резцов** (рис. 6.17): *проходные* (б), *подрезные* (в), *отрезные* (г) и *фасонные*. Резцы выполняют правыми и левыми, черновыми и чистовыми; их конструкции аналогичны конструкциям токарных резцов, однако стержни этих резцов более массивны с учетом ударного характера работы и отличаются изогнутостью (рис. 6.17, а), которая позволяет при изгибе из-за перегрузки обеспечить отвод режущей кромки от заготовки. *Долбежные резцы* выполняют трех основных типов (рис. 6.17): *проходные* (д), *прорезные* (е) и для *шпоночных пазов* (ж). Долбежные резцы работают на сжатие и отличаются от токарных и строгальных поперечным (относительно стержня) расположением передней поверхности.

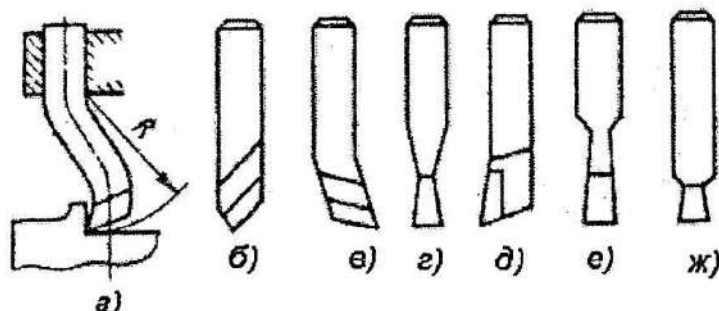


Рис. 6.17. Строгальные и долбежные резцы

Протяжки, в зависимости от типа обрабатываемых поверхностей, делят на внутренние и наружные, по конструкции - на цельные и сборные. *Круглая протяжка* предназначена для получения цилиндрических отверстий. Ее передняя замковая часть 11 (рис. 6.18, а) служит для закрепления протяжки в патроне каретки. Шейка 12 облегчает подачу протяжки к рабочему патрону через отверстие в заготовке. Передняя направляющая часть 13 служит для центрирования заготовки относительно оси протяжки. Ее диаметр соответствует диаметру отверстия в заготовке. На режущей части 14 располагаются режущие зубья, которые срезают припуск. Шаг зубьев режущей части выбирают так, чтобы во впадине каждого зуба размещалась вся срезаемая стружка и в работе одновременно участвовало не менее трех зубьев. На режущей части чередуются зубья с выкружками (рис. 6.18, в) и без них (рис. 6.18, г). Это облегчает стружкообразова-

ние и увеличивает стойкость инструмента.

Калибрующая часть 15 придает обрабатываемой поверхности окончательный размер и шероховатость. Задняя направляющая часть 16 служит для центрирования заготовки относительно протяжки до выхода из отверстия последнего зуба, что исключает перекося и поломку зубьев. Задняя замковая часть 17 предусматривается в тех случаях, когда протяжка закрепляется в патроне вспомогательной каретки.

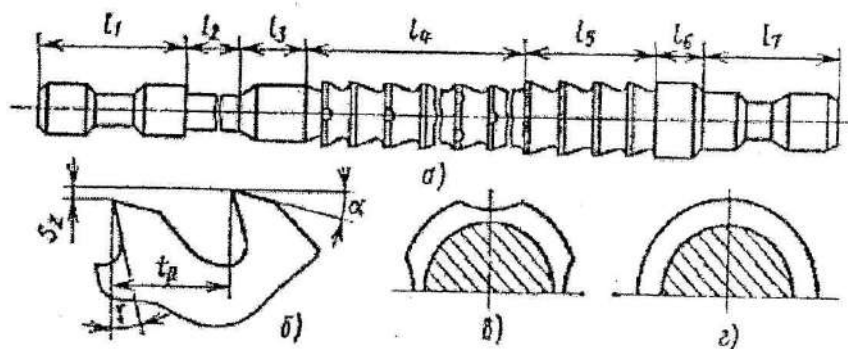


Рис. 6.18. Элементы круглой протяжки

Передний γ и задний α углы (рис. 6.18, б) измеряют в плоскости, перпендикулярной режущей кромке.

6.5.4. Схемы обработки заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках

Обработку *горизонтальных плоскостей* на строгальных станках выполняют проходными резцами.

При черновом строгании задают максимально возможную подачу и глубину резания (рис. 6.19, аII), а чистовое строгание осуществляют широким чистовым резцом при минимальной глубине резания. *Вертикальные плоскости* обрабатывают на продольно-строгальных станках проходными резцами, а на поперечно-строгальных-подрезными и проходными резцами, установленными под некоторым углом к обрабатываемой поверхности (рис. 6.19, аII), или на долбежных станках (рис. 6.19, б). Стругание *пазов и канавок* (рис. 6.19, аIII-IV) ведут прорезными резцами при вертикальной или поперечной подачах. Детали на столе станка закрепляют в машинных тисках, а также при помощи прижимных планок, накладок, болтов и т. д. Долбление широко применяют для *нарезания цилиндрических зубчатых колес зуборезным долбяком* (рис. 6.19, бV-VI) на зубодолбежных станках. Зуборезный долбяк совершает вертикальное возвратно-поступательное главное движение резания D_r и радиальное движение подачи D_s . Кроме того, долбяку и заготовке задается круговое вращение n_d и n_3 в период холостого хода долбяка.

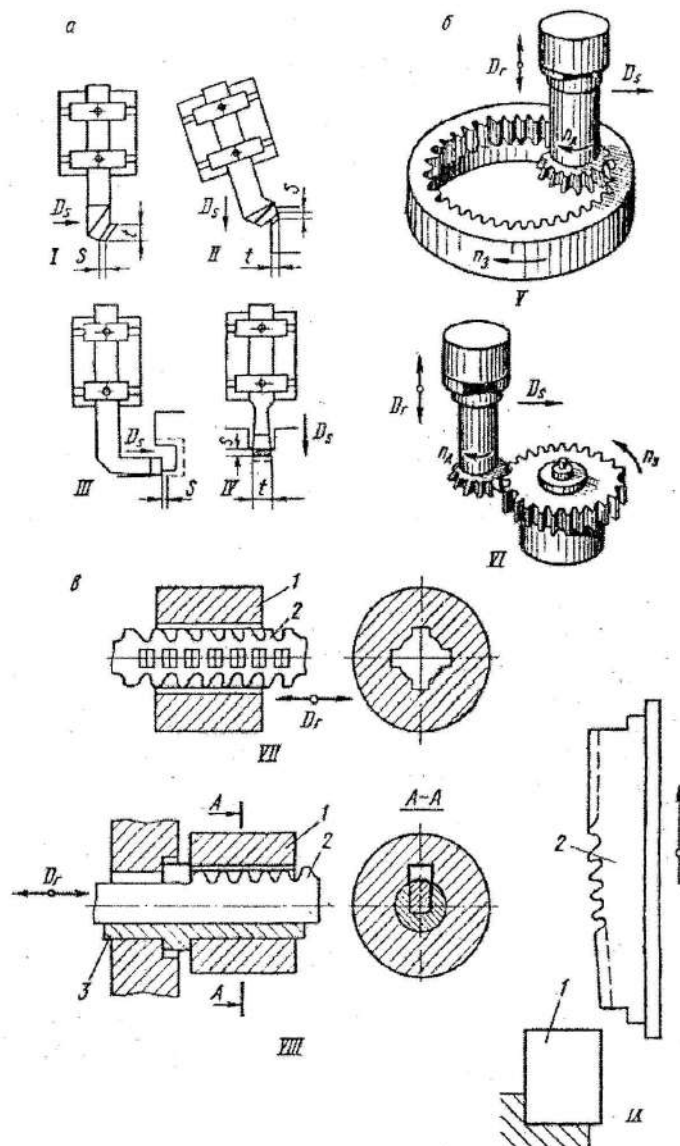


Рис. 6.19. Схемы строгания, долбления и протягивания

Протяжные работы применяют после сверления, растачивания, зенкерования, а также штамповки для чистовой обработки внутренних и наружных поверхностей.

Цилиндрические отверстия протягивают круглыми протяжками, а *итицевые* (рис. 6.19, в VII) - фасонными многошлицевыми протяжками, воспроизводящими требуемую форму поверхностей.

Шпоночные пазы протягивают плоскими шпоночными протяжками (рис. 6.19, в VIII) с направляющей втулкой.

На вертикальнб-протяжных станках протягивают плоские и фасонные поверхности (рис. 6.19, в IX) протяжками соответствующей формы.

ГЛАВА 7. ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

7.1. Обработка поверхностей абразивным инструментом

Физические основы и классификация абразивных методов обработки

Термин «абразивная¹ обработка» обозначает технологические методы, в которых форма и новое состояние поверхностей заготовки создаются при удалении припуска скабливанием микрообъемов материала с обрабатываемой поверхности абразивными инструментами, содержащими частицы — абразивные зерна с острыми вершинами и кромками из твердого, тугоплавкого материала. Зерна закреплены на теле твердых или эластичных абразивных инструментов либо входят в состав абразивных паст, абразивных суспензий, жидких или воздушных струй.

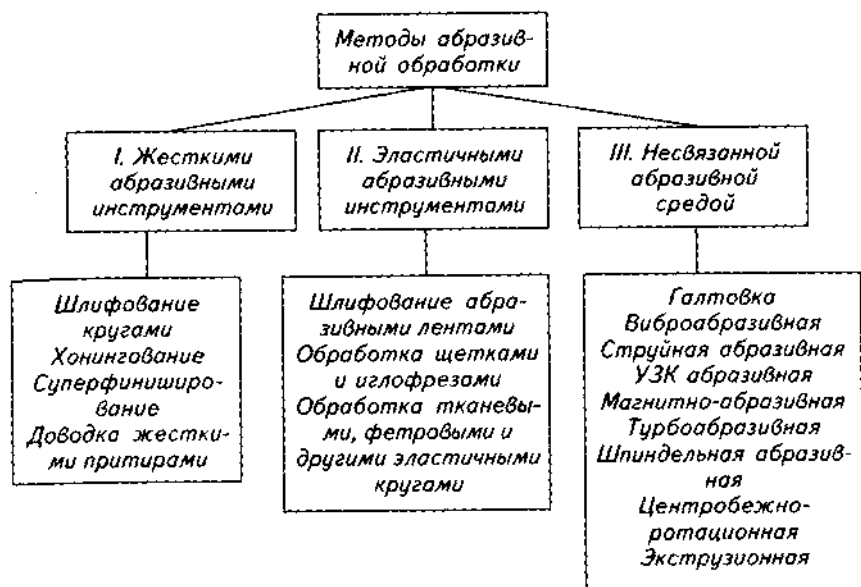
Классификация абразивных методов

Технологические возможности того или иного абразивного метода зависят от свойств абразивного инструмента и в значительной мере от жесткости закрепления или, наоборот, от степени подвижности абразивных зерен в инструменте. Эти факторы определяют вид взаимодействия абразивного инструмента с заготовкой. Чем больше жесткость закрепления зерен, тем успешнее решаются задачи формообразования и размерной точности. Чем больше подвижность абразивных зерен в инструменте, тем успешнее решаются задачи обеспечения высокого качества обработанной поверхности и обработки поверхностей сложной формы, но затрудняется или исключается создание новой формы поверхности и обеспечение точности ее размеров. С учетом этого обстоятельства абразивные методы обработки разделяют на три группы, для каждой из которых свойственны свои технологические возможности:

I. Методы, в которых используют инструменты с жестко закрепленными абразивными зернами; основная область применения — формообразование и размерная обработка, сопровождающиеся удалением сравнительно больших припусков и существенным снижением шероховатости поверхности.

II. Методы, в которых используют инструменты с эластично закрепленными в них абразивными зернами; области применения — формообразование, снижение шероховатости, зачистные работы с сохранением формы поверхности и незначительным изменением размеров.

III. Методы, в которых используют в качестве абразивного инструмента среду с не связанными между собой абразивными зернами или гранулами; области применения — полирование и зачистные работы с сохранением исходной формы и размеров поверхностей, в том числе труднодоступных.



Преимущественные области применения каждой группы методов не исключают возможности отдельных методов выполнять несвойственные для соответствующей группы задачи. Так, шлифованием (I группа) при измененных условиях можно осуществлять отделочную обработку и зачистку отливок, поковок. Струйно-абразивным методом (III группа) при супервысоких скоростях струи можно осуществлять точную вырезку заготовок со сложным контуром из листового материала.

7.1.1. Характеристика метода шлифования

Шлифованием называют процесс обработки заготовок резанием с помощью абразивного инструмента, совершающего с высокой скоростью главное движение резания. Абразивные зерна расположены в круге беспорядочно и удерживаются связующим материалом. Для формообразования поверхностей необходимо вращательное движение круга и относительное перемещение вдоль одной из координатных осей. При вращении круга в зоне его контакта с заготовкой часть зерен срезает материал в виде очень большого числа тонких стружек. Процесс резания каждым зерном осуществляется почти мгновенно. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микроследов абразивных зерен и имеет малую шероховатость. Часть зерен ориентирована так, что резать не может. Такие зерна производят работу трения по поверхности резания.

Абразивные зерна оказывают на заготовку существенное силовое воздействие, вызывают поверхностное пластическое деформирование материала, что приводит к упрочнению обработанной поверхности. Но этот эффект оказывается менее ощутимым, чем при обработке лезвийным инструментом.

Тепловое и силовое воздействие на обработанную поверхность приводит к структурным превращениям и к образованию дефектного поверхностного

слоя. Для уменьшения теплового воздействия процесс шлифования выполняют при обильной подаче смазочно-охлаждающих жидкостей.

Шлифование применяют для чистовой и отделочной обработки деталей с высокой точностью. Для заготовок из закаленных сталей шлифование является одним из наиболее распространенных методов формообразования.

7.1.2. Основные типы шлифовальных станков

Наиболее распространенными шлифовальными станками являются круглошлифовальные, внутришлифовальные, плоскошлифовальные, бесцентрово-шлифовальные, заточные, а также специализированные станки.

Круглошлифовальные станки (рис. 7.1, а) имеют поворотную переднюю 3, шлифовальную 4 и заднюю 5 бабки.

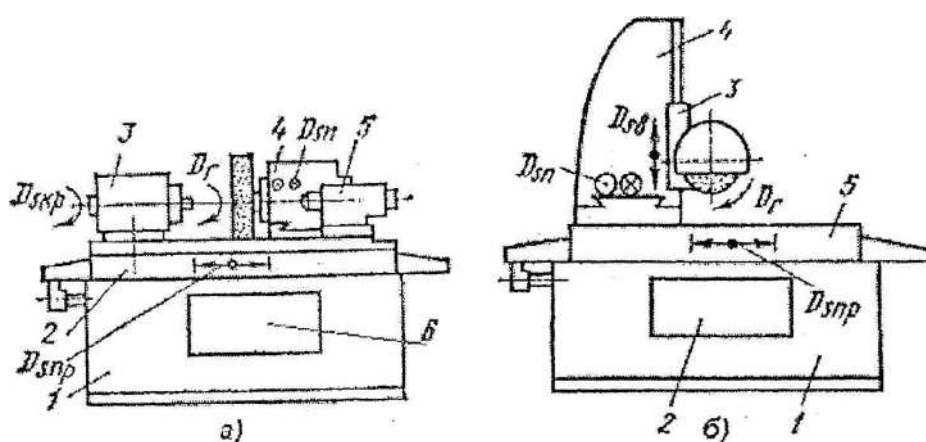


Рис. 7.1. Шлифовальные станки

Бабки 3 и 4 можно повернуть на заданный угол вокруг вертикальной оси. Возвратно-поступательное перемещение стола 2 по станине 1 производится с помощью гидропривода 6.

Плоскошлифовальные станки с прямоугольным столом (рис. 7.1, б) имеют шлифовальную бабку 3, которая перемещается по направляющим стойки 4. Движение подачи производится в крайних положениях стола 5. Возвратно-поступательное движение стола по станине 1 осуществляется с помощью гидропривода 2.

Закрепление заготовок на шлифовальных станках зависит от метода шлифования. На круглошлифовальных станках заготовки шлифуют в центрах, расположенных на передней и задней бабках. Круговое движение подачи заготовки обеспечивает поводковое устройство, приводимое во вращение планшайбой. Возможно закрепление заготовок в кулачковых патронах. На плоскошлифовальных станках заготовки закрепляют с помощью магнитных плит, а также в зажимных приспособлениях. Станки снабжают специальными устройствами для правки круга после его износа, а также приспособлениями для балансировки (уравновешивания) круга.

7.1.3. Режущий абразивный инструмент

Абразивные инструменты различают по геометрической форме и размерам, типу абразивного материала, зернистости, связке, твердости и структуре. При изготовлении инструмента абразивные зерна скрепляют друг с другом с помощью связки. Наиболее широко применяется связка керамическая, бакелитовая и вулканитовая. *Керамическую связку* готовят из глины, полевого шпата, кварца и других веществ, тонко измельчая и смешивая их в определенных пропорциях. *Бакелитовая связка* состоит в основном из синтетической смолы-бакелита. *Вулканитовая связка* представляет собой каучук, подвергнутый вулканизации для превращения его в прочный, твердый эбонит. Алмазные круги состоят из корпуса и алмазоносного слоя. Корпус изготовлен из алюминия, пластмассы или стали. Толщина алмазоносного слоя обычно 1,5-3 мм. Шлифовальные круги маркируются. Условные обозначения расположены в определенной последовательности: абразивный материал и его марка, номер зернистости, степень твердости, номер структуры, вид связки.

В процессе шлифования абразивные зерна изнашиваются, затупляются, поры между зернами заполняются шлифовальными отходами. Поверхность круга теряет свою первоначальную форму, и точность обработки снижается. Для восстановления режущих свойств абразивные инструменты подвергают *правке*, обычно алмазом. Алмаз укреплен в специальной державке и перемещается относительно вращающегося круга, при этом удаляются затупившиеся зерна и круг приобретает правильную геометрическую форму. Толщина слоя, удаляемая за один проход алмаза, не превышает обычно 0,03 мм.

Перед установкой на станок круги испытывают при вращении со скоростью, в 1,5 раза превышающей рабочую.

7.1.4. Схемы обработки

На круглошлифовальных станках наиболее распространены методы шлифования в центрах. *Круглое шлифование* (рис. 7.2) выполняется при вращательном главном движении резания шлифовального круга и круговом движении подачи заготовки.

При *шлифовании с продольным движением подачи* (рис. 7.2, а) заготовка вращается и совершает возвратно-поступательное движение. В конце хода заготовки круг перемещается на расстояние, равное поперечной подаче, и при следующем ходе вновь срезается слой металла заданной глубины.

Врезное шлифование (рис. 7.2, б) применяется, когда ширина шлифуемого участка меньше ширины шлифовального круга. Этот метод также используют в тех случаях, когда необходимо шлифовать фасонные поверхности и кольцевые канавки.

Глубинное шлифование (рис. 7.2, в) позволяет за один рабочий ход снять слой металла на всю необходимую глубину. Шлифовальный круг имеет кони-

ческий участок длиной 8-12 мм, который удаляет основную часть срезаемого слоя, а цилиндрический участок зачищает обработанную поверхность.

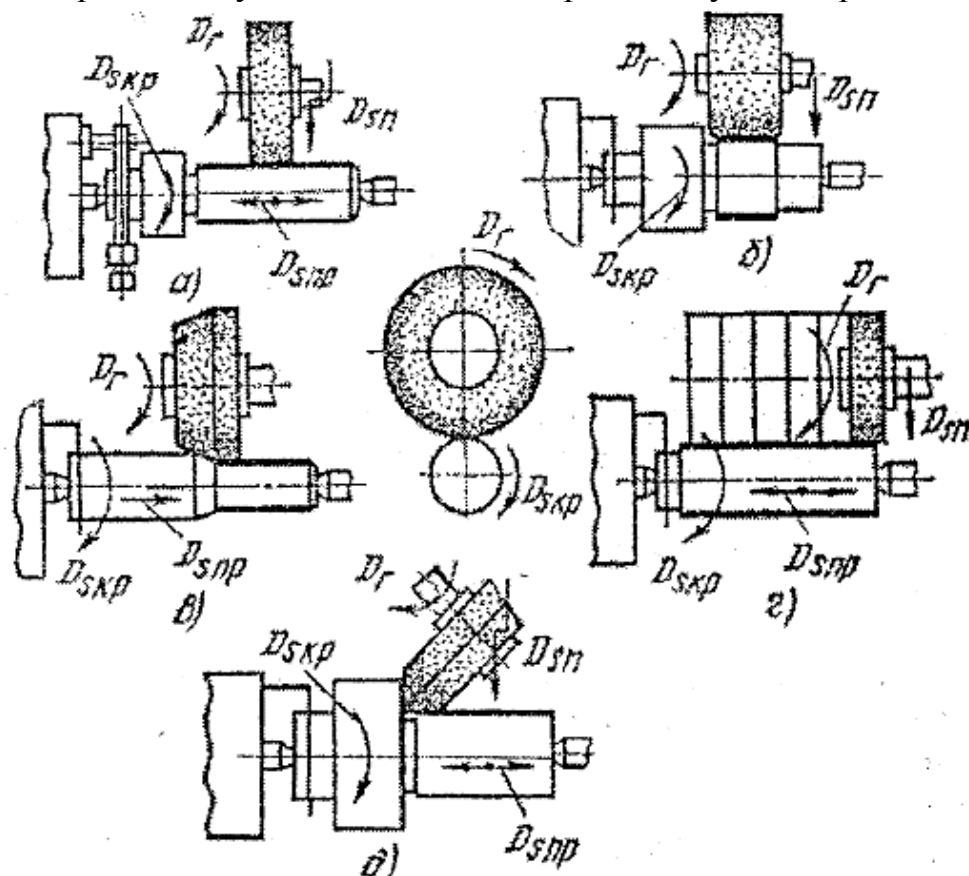


Рис. 7.2 Схемы круглого шлифования

При *шлифовании уступами* (рис. 7.2, г) производят обработку врезанием с поперечной подачей, периодически передвигая стол на 0,8-0,9 ширины круга. Затем выполняют несколько ходов с продольным движением подачи для зачистки поверхности при выключенной поперечной подаче.

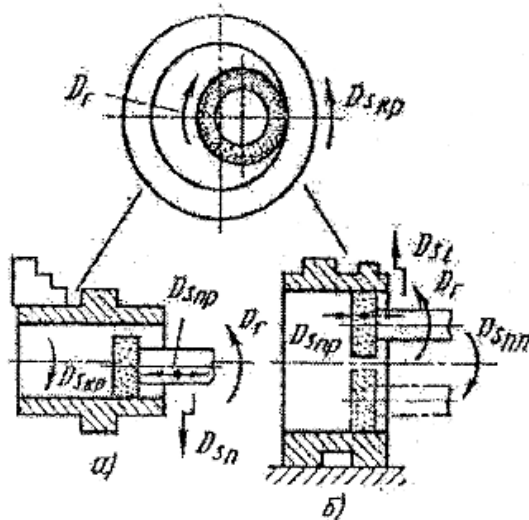


Рис. 7.3. Схема внутреннего шлифования

Для одновременной обработки цилиндрических и плоских (торцовых) поверхностей шлифовальный круг заправляют специальным образом и поворачивают на определенный угол (рис. 7.2, д). Шлифование производят коническими участками круга.

Внутреннее шлифование выполняют двумя методами (рис 7.3). При шлифовании с продольным движением подачи (рис 7.3, а) заготовки закрепляют в трехкулачковом патроне. Отверстия шлифуют на всю их длину либо часть длины, когда необходимо обработать лишь определенные участки. На внутришлифовальных станках обрабатывают такие внутренние торцовые фасонные и конические поверхности.

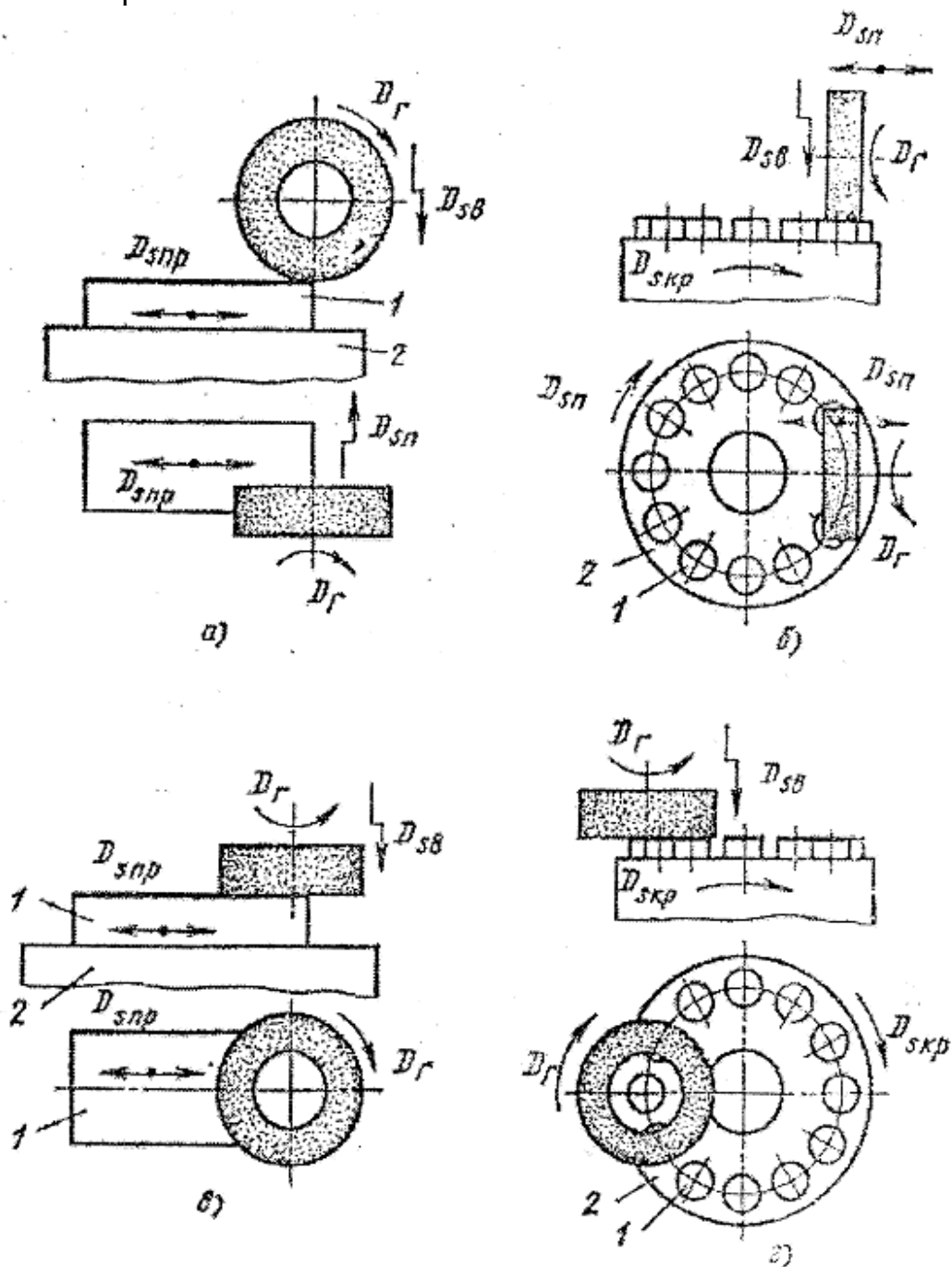


Рис. 7.4. Семь плоского шлифования.

Планетарное шлифование (рис. 7.3, б) применяют при обработке заготовок больших размеров. Заготовка неподвижно закрепляется на столе станка, шлифовальный круг вращается не только вокруг своей оси, но и вокруг оси отверстия, т. е. совершает планетарное движение, что аналогично круговому движению подачи. Периодически круг перемещается в радиальном направлении на глубину резания. Методы *плоского шлифования* (рис. 7.4) делят на четыре основных вида. Заготовки 1 закрепляют на прямоугольных или круглых столах 2. Прямоугольные столы совершают возвратно-поступательные движения (продольное движение подачи), движение подачи на глубину резания производится в крайних положениях столов. Круглые столы совершают вращательные движения, обеспечивая круговое движение подачи. *Шлифование торцом круга* (рис. 7.4, в, г) более производительно, так как одновременно в работе участвует большее число абразивных зерен, однако *шлифование периферией круга* (рис. 7.4, а, б) позволяет выполнить большее число разнообразных работ.

При *бесцентровом шлифовании* (рис. 7.5) заготовку 2 не закрепляют, она располагается на ноже 3 и одновременно контактирует с двумя кругами-шлифующим 4 и ведущим 1, которые вращаются в одном направлении, но с разными скоростями. Трение между ведущим кругом и заготовкой больше, чем между заготовкой и шлифовальным кругом, поэтому заготовка вращается со скоростью, близкой к окружной скорости ведущего круга. Перед шлифованием ведущий круг устанавливают под углом θ к оси заготовки. При разложении на составляющие вектора окружной скорости этого круга выделяется продольная составляющая (скорость продольной подачи V_s). С этой скоростью заготовка перемещается по ножу и шлифуется по всей длине (рис. 7.5, а).

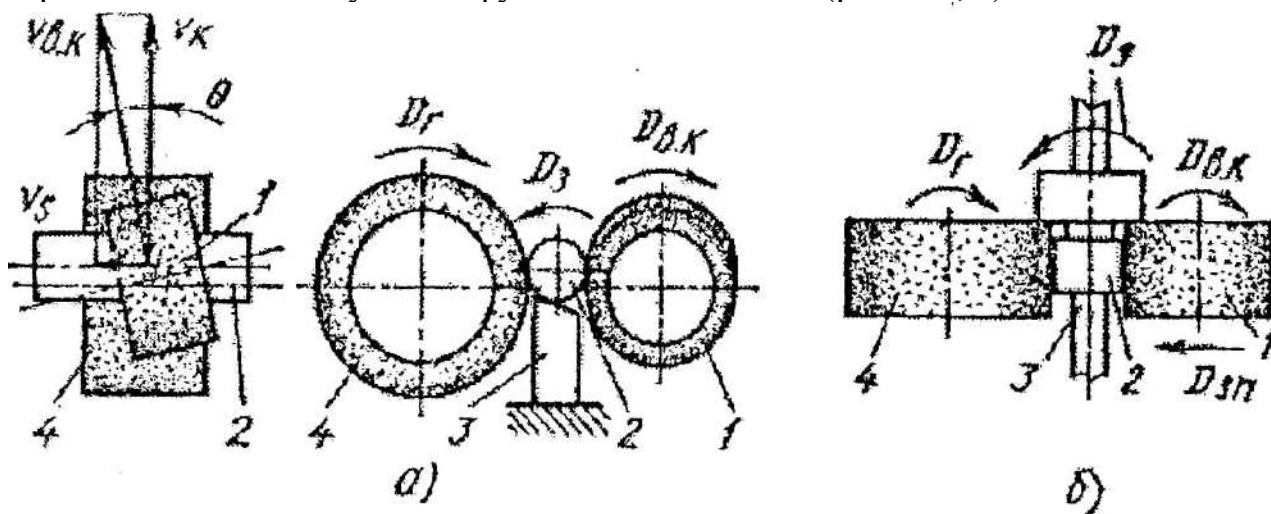


Рис. 7.5. Схема бесцентрового шлифования.

При шлифовании заготовок с уступами (рис. 7.5, б) бабку ведущего круга не поворачивают, а перемещают по направляющим станины до определенного положения, т. е. используют метод врезания.

7.1.5. Отделочная обработка поверхностей шлифовальными кругами и чистовыми резцами

Отделочную обработку проводят для того, чтобы повысить точность и уменьшить шероховатость поверхностей. Для отделочных методов характерны малые силы резания, небольшая глубина резания, незначительное тепловыделение.

Тонкое шлифование производят мелкозернистыми кругами при весьма малой глубине резания и обильной подаче охлаждающей жидкости. Особую роль играет жесткость доводочных станков, способных обеспечить безвибрационную работу.

Тонкое обтачивание применяют вместо шлифования. Процесс происходит при высоких скоростях главного движения резания, малых глубинах и подачах. Для отделки поверхностей используют резцы с широкими режущими кромками, которые располагают строго параллельно оси обрабатываемой заготовки.

Обтачивание алмазными резцами применяют для заготовок из цветных металлов и сплавов, пластмасс и других неметаллических материалов. *Тонкое растачивание* часто используют вместо шлифования, особенно в тех случаях, когда тонкостенные заготовки выполнены либо из вязких цветных сплавов, либо из стали, а также если по условиям работы детали недопустимо наличие абразивных зерен в порах обработанной поверхности.

7.1.6. Полирование

Полирование применяют для получения высокой точности и зеркального блеска ответственных частей деталей, например, дорожек качения подшипников. Обработку заготовки 1 производят полировальными пастами, которые наносятся на быстровращающиеся эластичные круги или колеблющиеся щетки 2 (рис. 7.6, а, б). Хорошие результаты дает полирование быстродвижущимися бесконечными абразивными лентами (шкурками) (рис. 7.6, в). Эластичная лента огибает всю шлифуемую поверхность, поэтому движения подачи могут отсутствовать.

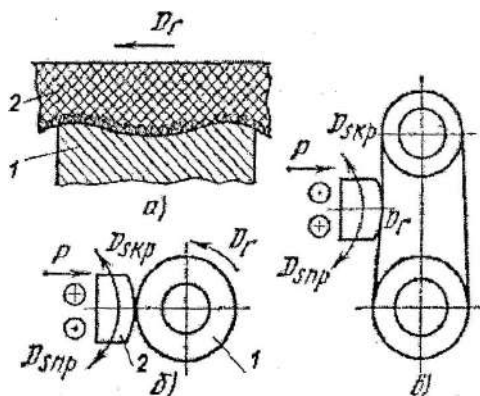


Рис. 7.6. Схемы полирования поверхностей

Полировальные круги изготавливают из войлока, фетра, кожи, капрона и других материалов. Процесс полирования выполняют на больших скоростях (до 50 м/с). Заготовка прижимается к кругу с усилием P (рис. 7.6, б) и совершает движения подачи $D_{снр}$ и $D_{скр}$ в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности. В процессе полирования не исправляются погрешности формы, а также местные дефекты предыдущей обработки.

7.1.7. Абразивно-жидкостная отделка

Отделка фасонных поверхностей обычными методами вызывает большие технологические трудности. *Абразивно-жидкостная отделка* позволяет решить задачу сравнительно просто. На обрабатываемую поверхность, имеющую следы предшествующей обработки, подается струя антикоррозионной жидкости со взвешенными частицами абразивного порошка (рис. 7.7, а). Водно-абразивная суспензия перемещается под давлением с большой скоростью. Частицы абразива ударяются о поверхность заготовки и сглаживают микронеровности, выполняя работу полирования. Содержание абразивного порошка в суспензии составляет 30-35 %.

При жидкостном полировании обрабатываемая заготовка 3 сложного профиля перемещается в камере 4 так, чтобы все ее участки подверглись полированию (рис. 7.7, б).

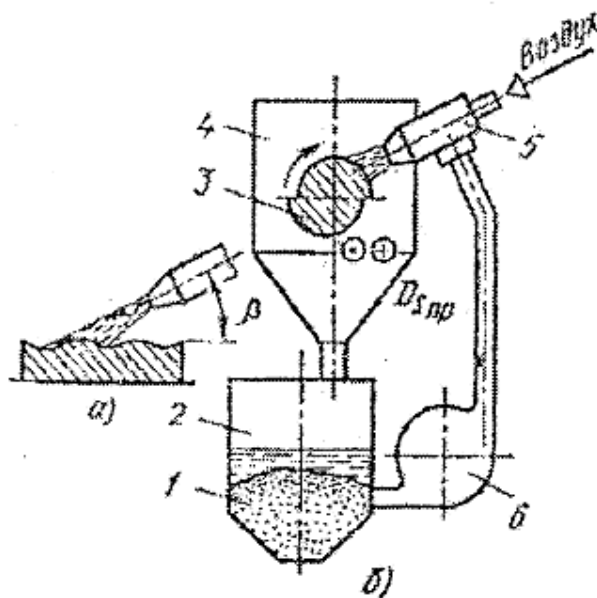


Рис. 7.7. Схема абразивно-жидкостной отделки

Абразивная суспензия 1, помещена в баке 2, подается насосом 6 в рабочую камеру 4 через твердосплавное сопло 5. Отработанная суспензия поступает обратно в бак 2 и может быть использована многократно.

Жидкостное полирование не повышает точность размеров и формы, а только уменьшает шероховатость поверхности.

7.1.8. Притирка

Поверхности деталей машин, обработанные на металлорежущих станках, всегда имеют отклонения от правильных геометрических форм и заданных размеров. Эти отклонения могут быть устранены притиркой (доводкой). **Притиркой** достигаются наивысшая точность и наименьшая шероховатость поверхности.

Процесс осуществляется с помощью *притиров* соответствующей геометрической формы. На притир наносят притирочную пасту или мелкий абразивный порошок со связующей жидкостью. Материал притиров должен быть мягче обрабатываемого материала. Паста или порошок внедряются (рис. 7.8, а) в поверхность притира 2 и удерживаются ею, но так, что при движении D относительно заготовки 1 каждое абразивное зерно может снимать весьма малую стружку. Поэтому притир можно рассматривать как очень точный абразивный инструмент.

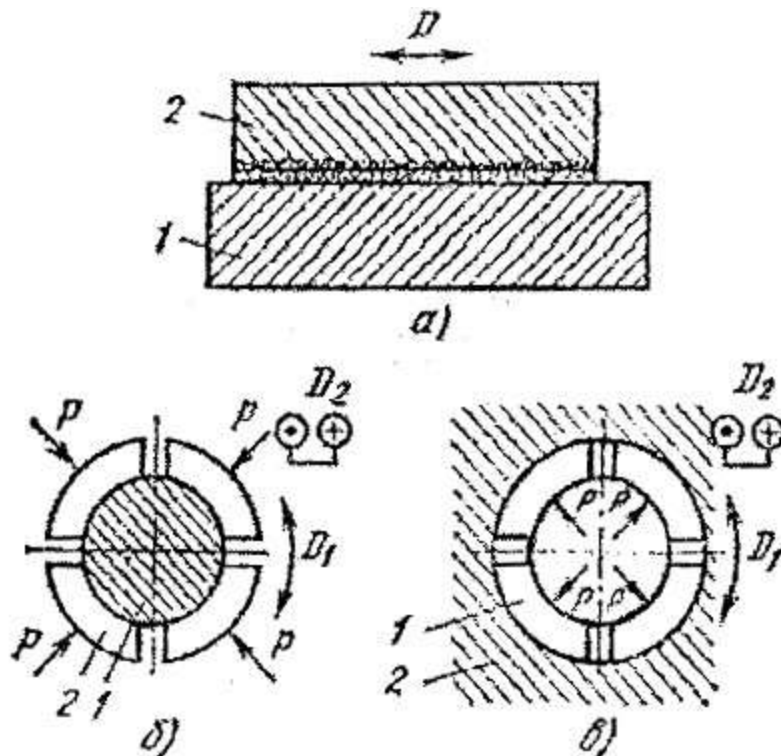


Рис. 7.8. Схемы притирки

Притир или заготовка должны совершать разнонаправленные движения. Наилучшие результаты дает процесс, в ходе которого траектории движения каждого зерна не повторяются. Для обработки наружной цилиндрической поверхности (рис. 7.8, б) применяют притир 2 в виде втулки, имеющей ряд прорезей, необходимых для его полного прилегания к обрабатываемой поверхности под действием силы P . Притиру сообщают возвратно-вращательное движение D_1 и возвратно-поступательное движение D_2 . Возможно также равномерное

вращательное движение заготовки 1 и одновременное движение B_2 . Аналогичные движения выполняются при *притирке отверстий* (рис. 7.8, в), однако притир должен равномерно разжиматься под действием силы P . Приведенные схемы притирки осуществляются на притирочных станках.

7.1.9. Хонингование

Хонингование применяют для получения отверстий высокой точности и малой шероховатости, а также для создания специфического микропрофиля обработанной поверхности в виде сетки для удержания на стенках отверстия смазочного материала при работе машины, например, двигателя внутреннего сгорания.

Поверхность неподвижной заготовки обрабатывают мелкозернистыми абразивными брусками, которые закрепляют в *хонинговальной головке (хоне)*, являющейся режущим инструментом. Инструмент вращается (D_1) и одновременно перемещается возвратно-поступательно (D_2) вдоль оси обрабатываемого отверстия (рис. 7.9, а). Сочетание движений приводит к тому, что на обрабатываемой поверхности появляется сетка микроскопических винтовых царапин - следов перемещения абразивных зерен. Угол θ пересечения этих следов зависит от соотношения скоростей движений D_1 и D_2 .

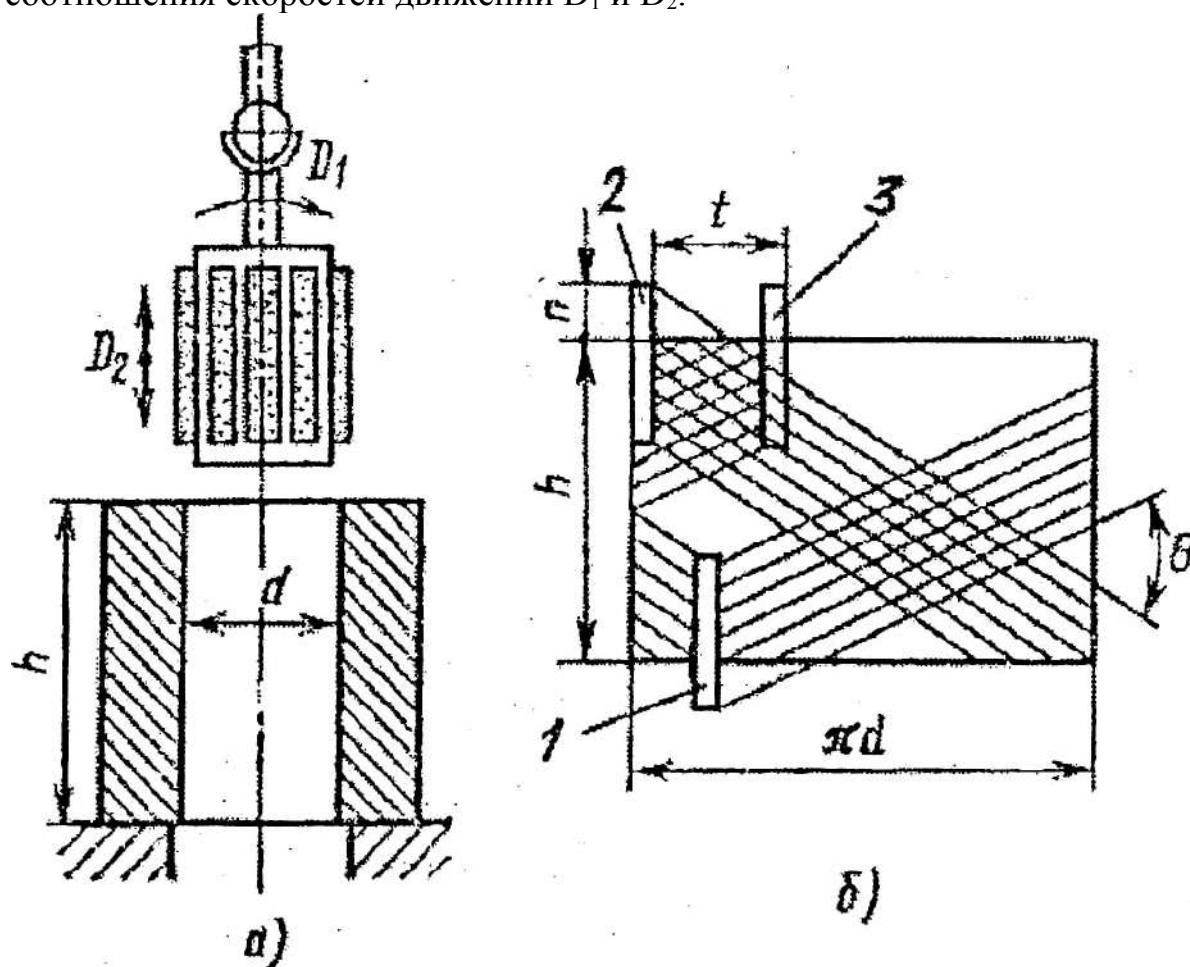


Рис. 7.9. Схема хонингования

Крайнее нижнее 1 и верхнее 2 положения абразивных брусков (рис. 7.9, б), указанные на развертке внутренней цилиндрической поверхности, устанавливают так, что создается перебег п. Пребег необходим для того, чтобы образующие отверстия были прямолинейными даже при неравномерном износе брусков. Абразивные бруски постоянно контактируют с обрабатываемой поверхностью, так как они раздвигаются в радиальных направлениях механическими, гидравлическими и другими устройствами.

Хонингованием исправляют такие отклонения от правильной геометрической формы, как овальность, конусность и другие, если эти отклонения не превышают 0,2 мм. Отклонения расположения оси отверстия этим методом не исправляются.

7.1.10. Суперфиниширование

Отделку поверхностей *суперфинишированием* выполняют для уменьшения шероховатости, оставшейся от предыдущей обработки. При этом меняется высота и вид микровыступов, а обработанная поверхность приобретает сетчатый рельеф. Суперфинишированием обрабатывают плоские, цилиндрические, конические, сферические поверхности заготовок.

Обработка ведется абразивными брусками, которые устанавливают в специальной головке. Для суперфиниширования характерно колебательное движение брусков одновременно с движением заготовки. Резание производится при давлении брусков 3-5 МПа с применением смазочного материала малой вязкости.

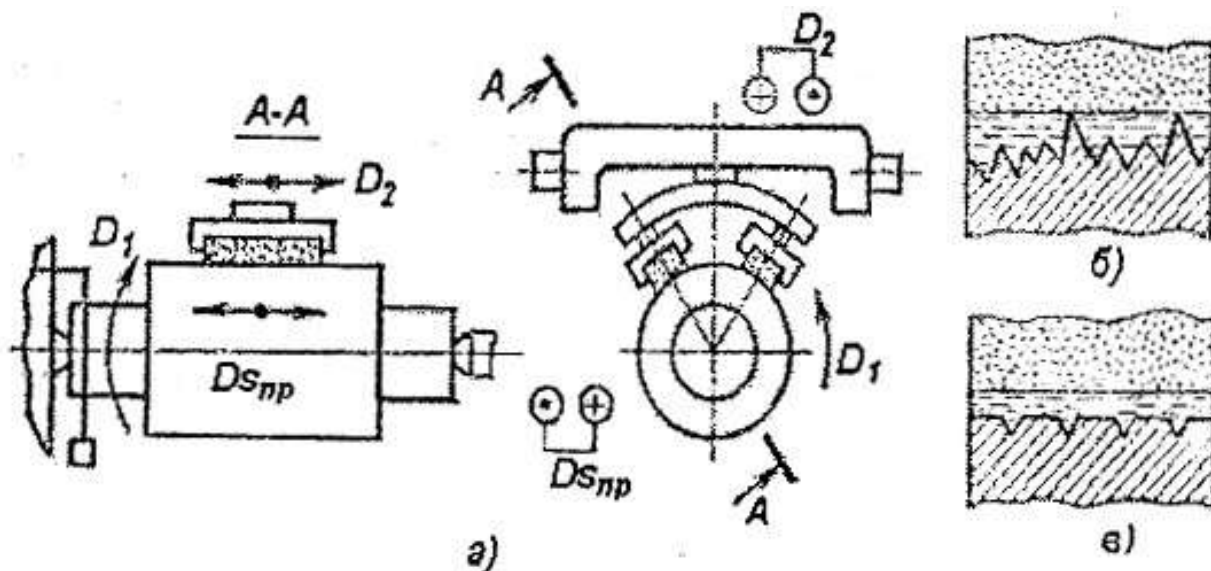


Рис. 7.10. Схема суперфиниширования

При обработке цилиндрической поверхности (рис. 7.10, а) сетка микро-

неровностей создается сочетанием вращательного движения D_1 заготовки, возвратно-поступательного ее перемещения $D_{сnp}$ и колебательного движения D_2 брусков вдоль оси заготовки. Движение D_2 ускоряет съем металла и улучшает однородность поверхности. Важную роль играет смазочно-охлаждающая жидкость. Масляная пленка покрывает обрабатываемую поверхность, но наиболее крупные выступы (рис. 7.10, б) прорывают ее и в первую очередь срезаются бруском. По мере обработки давление бруска снижается, так как все¹ больше число выступов прорывает масляную пленку, и, наконец, наступает такой момент (рис. 7.10, в), когда давление бруска не может-разорвать пленку, она становится сплошной. Создаются условия для жидкостного трения. Процесс отделки автоматически прекращается. Суперфиниширование не устраняет отклонения формы, полученные во время предшествующей обработки (волнистость, конусность, овальность и др.).

ГЛАВА 8. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Основы сварочного производства

Сварку широко применяют практически во всех отраслях промышленности: ее используют в судостроении при изготовлении корпусов судов, при строительстве домн, электропечей, резервуаров для хранения жидкостей и газов, нефте- и газопроводов, при производстве котлов, паровых турбин, в автомобилестроении, микроэлектронике и т.д.

Внедрение сварки в технологический процесс изготовления новых изделий зачастую связано с экономически выгодной заменой литых и кованных конструкций. Эта выгода проявляется в экономии металла, снижении трудоемкости, повышении мобильности производства, улучшении условий труда.

Процесс сварки состоит в получении неразъемных соединений из металлов,

сплавов и других материалов в результате образования при определённых условиях атомно-молекулярных связей между частицами соединяемых заготовок.

Металлы и сплавы в твердом состоянии являются кристаллическими телами. Идеализированная схема отдельного кристалла представляет собой кристаллическую решетку кубического или более сложного типа. В узлах решетки расположены положительно заряженные ионизированные атомы металла, а их валентные электроны обобществлены в объеме всего кристалла.

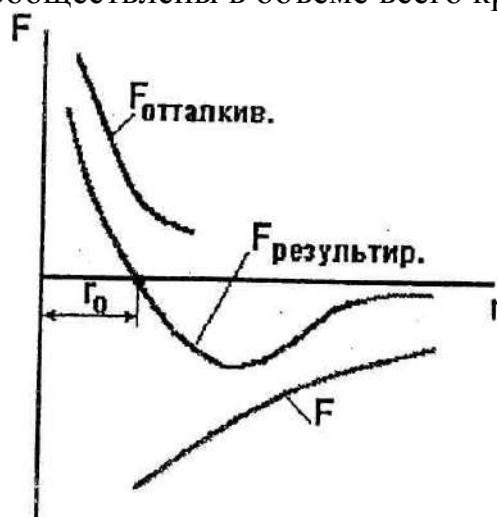


Рис. 8.1. Изменение силы межатомного взаимодействия в зависимости от расстояния

Узлы решетки колеблются около нейтрального положения, причем амплитуда их колебаний увеличивается с повышением температуры. Расстояние между атомами в кристалле определяется силами межатомного взаимодействия (рис. 8.1). Силы отталкивания возникают между положительными зарядами ядер атомов и между отрицательными зарядами их электронных оболочек.

Силы притяжения обусловлены взаимодействием между ионами, составляющими решетку, и подвижными коллективизированными электронами. Для конкретного металла r_0 - расстояние между атомами, при котором силы отталкивания и притяжения уравновешены, - является параметром кристаллической решетки.

Обычно для большинства металлов параметр кристаллической решетки составляет $3 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-8}$ см (3-5 Å). Таким образом, чтобы получить прочное сварное соединение, необходимо сблизить поверхностные атомы двух тел на расстояние 3-5 Å.

Современные методы обработки поверхности металлов, включая полировку, могут обеспечить отклонение неровностей поверхности $10^{-4} - 10^{-5}$ см. Если соединить две полированные поверхности, то они будут соприкасаться только в отдельных точках (рис. 8.2), и прочного соединения не произойдет.



Рис. 8.2. Схема соприкосновения двух металлических поверхностей

Кроме того, на процесс сварки сильно влияют поверхностные загрязнения металлов - окислы, жировые пленки, а также адсорбированные молекулы газов, образующиеся на свежезачищенной поверхности металла под действием атмосферы почти мгновенно. Хотя давление и сближает тела, но прочного соединения не получается. На практике существует несколько десятков способов сварки, однако по характеру протекания процессов формирования соединений они могут быть получены только следующими путями: 1) сваркой плавлением, 2) сваркой давлением (например, холодная сварка пластичных металлов) и 3) сваркой с применением нагрева и давления (например, электроконтактная или кузнечная сварка).

Сущность процесса заключается в том, что источником тепла при этом виде сварки является электрическая дуга. Различают следующие схемы дуговой сварки.

1) *Сварка неплавящимся электродом* (угольным или вольфрамовым) I дугой прямого действия 2 (рис. 8.3, а); Соединение выполняется путем расплавления только основного металла 3 либо с применением присадочной проволоки 4.

2) *Сварка плавящимся электродом* (металлическим) 1 дугой прямого действия 2 (рис. 8.3, б). Одновременно расплавляется основной металл 3 и электрод 1, который пополняет сварочную ванну жидким металлом.

3) *Сварка косвенной дугой* 5 (рис. 8.3, в), горящей между двумя неплавящимися электродами 1 (в настоящее время способ почти не

применяется).

4) Сварка трехфазной дугой 6 (рис. 8.3, г), при которой дуга горит между электродами 1, а также между каждым электродом и основным металлом 3.

При применении постоянного тока различают сварку на *прямой* (минус на электроде) и *обратной полярности* (плюс на электроде, применяется для сварки тонколистовых материалов).

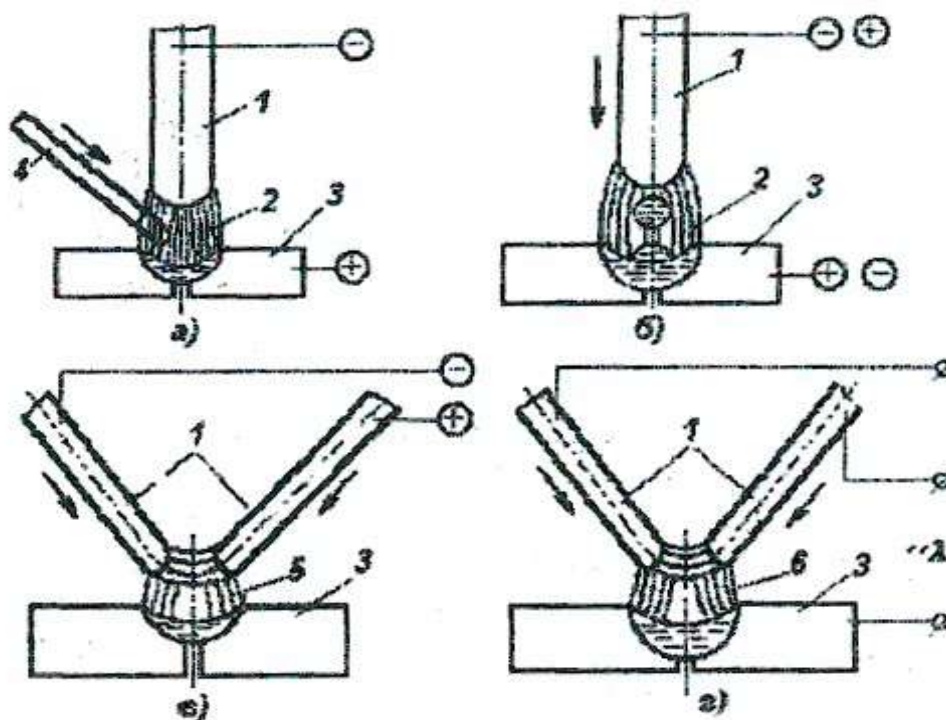


Рис. 8.3. Схемы электродуговой сварки

Электрическая дуга является мощным источником тепла. Температура в столбе дуги достигает 6000 °С, температура катодного пятна 5 - 2400 °С анодного пятна 7 - 2600 °С. Полная тепловая мощность дуги (в Дж/с):

$$Q = K \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}}$$

где K для постоянного тока равен единице, для переменного тока - 0,7-0,9; $I_{\text{св}}$ - сварочный ток, А; $U_{\text{д}}$ - напряжение дуги, В.

Электрические свойства дуги описываются статической вольтамперной характеристикой, представляющей зависимость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 8.4). Характеристика состоит из трех участков. На участке I характеристика падающая, на участке II - жесткая; на участке III - возрастающая. Самое широкое применение имеет дуга с *жесткой* характеристикой, когда напряжение практически не зависит от тока: при ручной дуговой сварке, автоматической под флюсом, в среде защитных газов неплавящимся электродом.

Дугу с *возрастающей* характеристикой используют при сварке в защитных газах плавящимся электродом, а также при автоматической сварке под флюсом при повышенных плотностях тока.

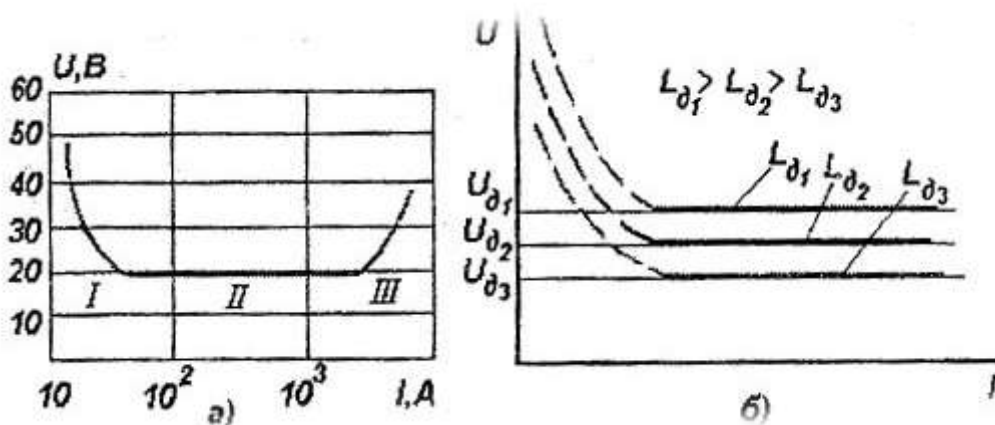


Рис. 8.4. Статистическая характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги U_d от её длины L_d (б)

Дуга с *падающей* характеристикой малоустойчива, имеет ограниченное применение (при сварке тонколистовых сталей с использованием осциллятора). Каждому участку характеристики дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: I и II - крупнокапельный, III - мелкокапельный или струйный.

У дуги с жесткой характеристикой напряжение U_d пропорционально ее длине L_d :

$$U_d = a + \beta \cdot L_d,$$

где a и β - опытные коэффициенты (для стальных электродов $a=10$ В, $\beta=2$ В/мм). Из приведенной зависимости следует, что для сохранения напряжения дуги неизменным необходимо длину дуги поддерживать постоянной.

Понятие свариваемости

Под *свариваемостью* понимается способность металла образовывать при сварке тем или иным способом сварное соединение, удовлетворяющее установленным техническим требованиям.

На свариваемость сталей главное влияние оказывает углерод и легирующие элементы. Чем больше содержание углерода в стали, тем ниже свариваемость. Легирующие элементы влияют на свариваемость по-разному, поэтому их влияние оценивается по *числовому эквиваленту* к углероду. Величиной этого суммарного эквивалента оценивают свариваемость стали:

$$С_{экв.} = C + Mn/20 + Ni/15 + Cr/10 + Mo/10 + V/10, \%$$

(Здесь C, Mn, Ni, Cr, Mo, V - процентное содержание элементов в стали.)

По признаку свариваемости все стали можно условно разделить на четыре группы:

1. *Хорошо сваривающиеся стали*, у которых $С_{экв.}$ не более 0,25. Эти стали не дают трещин при сварке, не требуют подогрева и термической обработки.

2. *Удовлетворительно сваривающиеся стали*, $C_{\text{ЭКВ}}$ в пределах 0,25-0,35; они обеспечивают сварку без трещин только в нормальных производственных условиях, т. е. при температуре не ниже 0 °С и без ветра, иначе они требуют подогрева при сварке.

3. *Ограниченно сваривающиеся стали*, у которых $C_{\text{ЭКВ}}$ в пределах 0,35-0,45. При сварке таких сталей требуется предварительный подогрев.

4. *Плохо сваривающиеся стали*, у которых $C_{\text{ЭКВ}}$ выше 0,45. Такие стали можно сваривать с применением предварительного, сопутствующего и последующего подогрева:

Эквивалент углерода $C_{\text{ЭКВ}}$, %	0,5	0,60	0,62	0,74	0,85
Температура подогрева, °С	100	125	150	175	200

Высоколегированные стали при сварке нагревают до 300 °С и выше. По эквиваленту углерода оценивают свариваемость предварительно и приближенно. Более точные данные о свариваемости получают по следующим показателям:

1. Склонность металла шва к образованию горячих и холодных трещин.

2. Склонность к изменению структуры в околошовной зоне и к образованию закалочных структур.

3. Физико-механические свойства сварного соединения и соответствие их требованиям условий эксплуатации.

Полные и точные данные о свариваемости получают путем проведения технологических испытаний (проб) и окончательные сведения о свариваемости получают из поведения изделия при эксплуатации. Предварительные представления о свариваемости легированных сталей дает классификация сталей по структуре в нормализованном состоянии (перлитные, ферритные, мартенситные, аустенитные, карбидные стали).

Строение сварного шва

При сварке низкоуглеродистых сталей в ней отмечают участки (рис. 8.5) неполного расплавления, перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации, рекристаллизации и синеломкости.

1) Участок неполного расплавления примыкает непосредственно к сварному шву и является переходным от литого металла шва к основному. На этом участке происходит образование соединения и проходит граница сплавления. Он представляет собой узкую область (0,1-0,4 мм) основного металла, нагревавшегося до частичного оплавления зерен.

2) Участок перегрева - область основного металла, нагреваемого до температур 1100 - 1450°С, в связи с чем металл его отличается крупнозернистой

структурой и пониженными механическими свойствами и тем заметнее, чем крупнее зерно и шире зона перегрева.

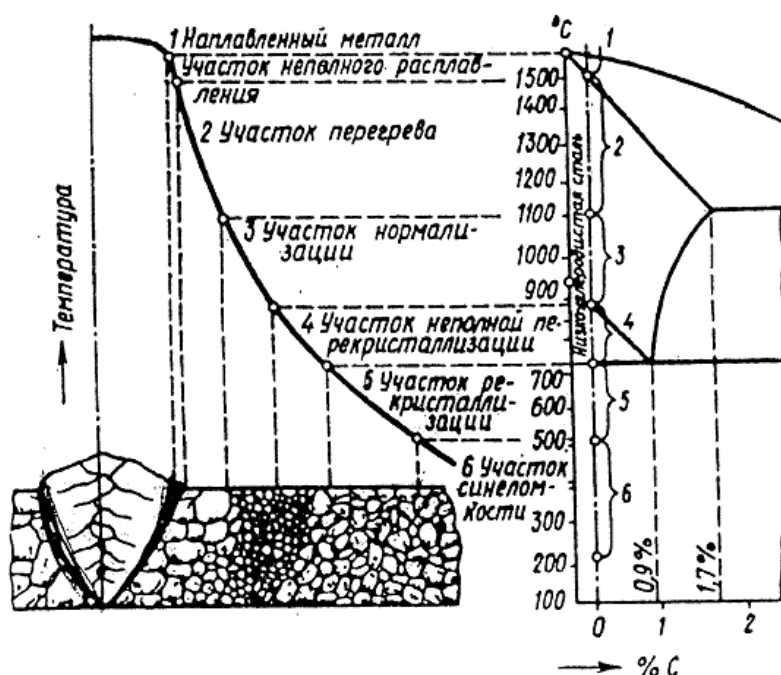


Рис. 8.5. Структура металла в зоне термического влияния шва при сварке низкоуглеродистой стали

3) Участок нормализации (перекристаллизации) охватывает область основного металла, нагреваемого до температуры 900—1100°C. Металл этого участка обладает высокими Механическими свойствами, так как при нагреве и охлаждении на этом участке образуется мелкозернистая структура в результате перекристаллизации без перегрева.

4) Участок не полной перекристаллизации нагревается в пределах температур 725—900°C. В связи с неполной рекристаллизацией, вызванной недостаточным временем и температурой нагрева, структура металла состоит из смеси мелких перекристаллизовавшихся зерен и крупных зерен, которые не успели перекристаллизоваться. Свойства его более низкие, чем у металла предыдущего участка.

Участок рекристаллизации наблюдается при сварке сталей, подвергавшихся холодной деформации (прокатке, ковке, штамповке). При нагреве до температуры 450—725°C в этой области основного металла развивается процесс рекристаллизации, приводящий к росту зерна, огрублению структуры, к разупрочнению металла.

Участок нагреваемы в области температур 200—450°C, является переходным от зоны термического влияния к основному металлу. В этой области могут протекать процессы старения металла в связи с выпадением карбидов и нитридов железа. Понижается пластичность и вязкость металла. По структуре этот участок практически не отличается от основного металла. Таким образом, сварное соединение характеризуется неоднородностью свойств. Ширина околошов-

ной зоны зависит от толщины металла, вида и режима сварки. Например, при ручной дуговой сварке она составляет обычно 5—6 мм.

Ручная дуговая сварка

Ручной дуговой сваркой изготавливается более 60 % сварных конструкций. Для получения качественного сварного соединения производят подготовку свариваемых заготовок под сварку. Очищают свариваемые кромки от ржавчины, окислы, масла, влаги, наличие которых приводит к образованию пор, включений и других дефектов. При сборке заготовок под сварку необходимо обеспечить требуемую точность пригонки и закрепление с помощью прихваток или механических прижимов. Для ручной дуговой сварки применяются источники, как переменного тока, так и постоянного тока: сварочные трансформаторы типа СТЭ, сварочные генераторы типа ПСО, ПС (ПС-300, ПСО-500), сварочные выпрямители типа ВСС, ВКС.

Ручную дуговую сварку выполняют штучными электродами с покрытием.

Из сварочной проволоки изготавливают стержни плавящихся электродов с покрытием. При сварке под флюсом и в среде защитных газов сварочная проволока используется в качестве плавящегося электрода без покрытия.

Согласно ГОСТ 2246-70, стальная сварочная проволока выпускается диаметром 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10 и 12 мм. ГОСТ предусматривает выпуск проволоки из сталей 77 марок. Сварочная проволока подразделяется на 3 группы:

- а) *низкоуглеродистая* (марки Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2 и др.);
- б) *легированная* (марки Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-08ХГС и др.);
- в) *высоколегированная* (марки Св-06Х14, Св-12Х13, Св-06Х18Н9Т и др. для сварки специальных высоколегированных сталей).

Электроды классифицируют по видам покрытий и по назначению.

Покрытие предназначено для повышения устойчивости горения дуги, образования газовой и шлаковой защиты жидкого металла сварочной ванны от вредного влияния воздуха, легирования, раскисления и рафинирования металла шва. В состав покрытий входят следующие материалы (компоненты):

1. *Газообразующие*. Это либо органические вещества (крахмал, декстрин, пищевая мука, целлюлоза), либо неорганические - обычно карбонаты (мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 , мел CaCO_3 и др.).

Органические вещества при нагреве выделяют CO ; H_2 ; CO . Неорганические - газ и шлак: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

2. *Легировующие* элементы - Cr, Mo, Ni, Mn, Si и др. - используются в виде сплавов этих элементов с Fe, так называемых ферросплавов.

3. *Ионизирующие* или *стабилизирующие* компоненты, содержащие элементы с низким потенциалом ионизации, - это соединения, в состав которых входят K, Na, Ca.

4. *Раскислители* нужны для удаления кислорода из шва. Для этой цели вводят элементы, обладающие большим сродством к кислороду: Mn, Si,

Ti, Al.

Раскисление кремнием: $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$.

5. *Шлакообразующие* - составляют основу покрытия. Обычно это руды

(марганцевая MnO , титановая TiO_2) и минералы (ильменит и рутил с содержанием TiO_2 до 30-45 %, полевой шпат, кремнезем, мрамор CaCO_3 , плавленый шпат CaF_2 , гранит). Состав шлаков - это окислы: CaO , MgO , MnO , FeO , Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 .

При изготовлении электродов для сварки алюминия и его сплавов ввиду его большого сродства к кислороду применять покрытия из окислов нельзя. В этих случаях покрытия состоят из бескислородных соединений: хлоридов и фторидов (KCl , NaCl , KF и т. п.), которые наносят на стержни многократным окунанием в водные растворы указанных компонентов.

6. *Связующие* - водные растворы силикатов натрия и калия, называемые натриевым и калиевым жидким стеклом, а также натриево-калиевым жидким стеклом.

Na и K играют одновременно роль ионизирующих элементов.

7. *Формовочные добавки* - вещества, придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства (бентонит, каолин, декстрин, слюда).

8. Для повышения производительности сварки в покрытие может вводиться дополнительно до 60 % *железного порошка*.

9. *Рафинирующие* компоненты необходимы для удаления вредных примесей S и P.

Серу удаляют с помощью Mn, а фосфор - с помощью CaO.

Некоторые элементы одновременно выполняют несколько функций, например, мрамор обеспечивает и газовую, и шлаковую защиту:

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$. Классификация электродов по видам покрытий облегчает выбор марки электродов. Дело в том, что в мире существуют тысячи марок электродов и все они могут быть отнесены только к четырем разновидностям в зависимости от *вида покрытия*. Состав, свойства и применение электродов любой марки определяется видом покрытия.

1. *Рудно-кислое покрытие*, условное обозначение "А". Главную часть покрытия составляют руды (MnO , SiO_2 , Fe_2O_3 и др.). Защита жидкого металла сварочной ванны от вредного влияния воздуха состоит из кислых шлаков.

Металл шва имеет повышенное содержание кислорода, и по этой причине электроды не боятся загрязнений на свариваемых поверхностях. Типичные представители - электроды марок ОММ-5 и ЦМ-7. В настоящее время вместо электродов ОММ-5 выпускаются менее токсичные электроды марки ОЗС-4, а вместо ЦМ-7 - электроды ОЗС-6. Все электродные покрытия имеют, кроме шлаковой, еще и газовую защиту. Газовая защита создается добавками в покрытие органических веществ или мела CaCO_3 .

Любые марки электродов с рудно-кислым покрытием имеют низкую стоимость, т. к. состоят из дешевых и недефицитных компонентов. Недостаток

этого покрытия - склонность к образованию горячих трещин, токсичность из-за марганца и выделение большого количества пыли при сварке. Эти покрытия обладают самыми низкими гигиеническими свойствами. Поэтому их можно применять только при сварке на открытом воздухе или с хорошей вентиляцией помещения. Электроды применяются для сварки углеродистых сталей на постоянном и на переменном токе.

2. *Рутитовое покрытие* на основе минерала рутила TiO_2 , условное обозначение "Р".

Типичный представитель - электроды марки МР-3. Однако рутил дорогой и дефицитный минерал. В последнее время изготавливаются электроды марки АНО-6 и др. на основе ильменита (в нем меньше TiO_2). Достоинство рутитовых электродов: самая высокая технологичность. Это значит, что они обеспечивают самую высокую производительность при сварке и красивый шов. Нетоксичны. Применяются для сварки углеродистых сталей на постоянном и переменном токе.

3. *Основное покрытие*, условное обозначение "Б".

Состоит из мрамора $CaCO_3$ и плавикового шпата CaF_2 . Главная защита - газовая. Во время сварки при разложении $CaCO_3$ выделяется много газов CO и CO_2 . Шлаковая защита состоит из CaF и CaO . Кислых

окислов нет. Типичный представитель - электроды марки УОНИ-13. Недостаток электродов с этим покрытием - высокая чувствительность к загрязнениям на свариваемых поверхностях. Требуют тщательной зачистки свариваемых кромок. Кроме того, сварка возможна только на постоянном токе.

Достоинства - незаменимы при сварке всех легированных сталей.

Применяются для сварки особо ответственных конструкций.

4. *Целлюлозное покрытие*, условное обозначение "Ц".

Построено на органической основе. Выделяет много защитного газа, поэтому хорошо обеспечивает потолочную сварку. Типичный представитель - электроды марки ОМА-2. Применяются в основном для сварки тонколистовых сталей на постоянном и переменном токе. Электроды с таким покрытием имеют ограниченное применение из-за появления сварки в углекислом газе. По механическим свойствам электроды разделяются на три группы по назначению:

1. Электроды *для сварки углеродистых конструкционных сталей* Э34, Э42, Э42А, Э46, Э46А и т. д., где "Э" - электрод, а число - прочность наплавленного металла в кгс/мм².

2. Электроды *для сварки теплоустойчивых сталей*: ЭМ, ЭХМ и др.

3. Электроды *для сварки высоколегированных сталей* ЭА-3М6 (аустенитного типа), ЭФ-13 (ферритного типа), ЭН-50Х11-55, ЭНГ-62 (электроды для наплавки, где "Н" - наплавочный, число в конце марки - твердость HRC).

Технология и техника ручной дуговой сварки

Технология сварки отражается в технологической карте и представляет

собой описание последовательно выполняемых операций сварки узлов конструкции. Технологическая карта включает данные о свойствах свариваемого металла, вид оборудования, сварочные материалы, режим сварки, технику сварки, контроль качества. К основным параметрам режима сварки относятся диаметр электрода и сила тока. Эти параметры должны быть заданы сварщику. Диаметр электрода выбирается в зависимости от толщины свариваемых листов по формуле:

$$d = S/2 + 1, (мм)$$

или по таблицам из справочника:

Толщина свариваемых листов, мм	1-2	3	4-5	>6
Диаметр электрод, мм	1.5-2.5	3	3-4.	4-6

Сварочный ток определяется по диаметру электрода по формуле: $I = K \cdot d$, где K – эмпирический коэффициент, для малоуглеродистой стали $K=25-40$, или выбирается по таблице:

Диаметр электрода, мм	3	4	5
Сила тока, А	110-120	150-160	150-200

Кроме основных параметров режима, существуют дополнительные параметры, которые сварщик выбирает сам. Это длина дуги L и скорость сварки $V_{св}$. Длина дуги определяется по формуле:

$$L = d/2 + 1 (мм),$$

где d - диаметр электрода.

Увеличение длины дуги приводит к увеличению напряжения, при этом увеличивается ширина шва и уменьшается глубина проплавления. При увеличении скорости сварки уменьшается глубина проплавления. Скорость сварки $V_{св} = \alpha_n \cdot I_{св} / (3600 \cdot \gamma \cdot F_n)$,

где α_n - коэффициент наплавки, г/А-час, определяется количеством наплавленного металла G_n за час при силе тока в 1 ампер: $\alpha_n = G_n / (I \cdot t)$; γ - плотность наплавленного металла, г/см³; F_n - площадь поперечного сечения шва, см².

Преимущества электродуговой сварки:

1. Универсальность способа, т. е. можно сваривать все металлы, любые конструкции во всех пространственных положениях.

2. Большая оперативность способа позволяет производить сварку во многих ситуациях (при авариях, при ремонте в полевых условиях и т. п.).

3. Простота процесса и оборудования.

4. Возможность получения высококачественных соединений. Недостатки:

1. Качество шва зависит главным образом от квалификации сварщика.

2. Тяжелые условия выполнения сварки (в условиях сквозняков из-за сильной вентиляции или под открытым небом в зимних условиях).

3. Низкая производительность.

Применение:

1. Ручной дуговой сваркой выполняется более 50 % всех сварных конструкций (по весу).

2. Способ применяется во всех отраслях промышленности (в разных отраслях машиностроения, при прокладке газо- и нефтепроводов, в гражданском и промышленном строительстве и т. д.).

3. Ручной дуговой сваркой сваривают все малоуглеродистые и низколегированные стали. При сварке сталей с повышенным содержанием углерода или легирующих элементов требуется зачастую предварительный, сопутствующий и последующий подогрев для предотвращения закалочных трещин.

Газовая сварка

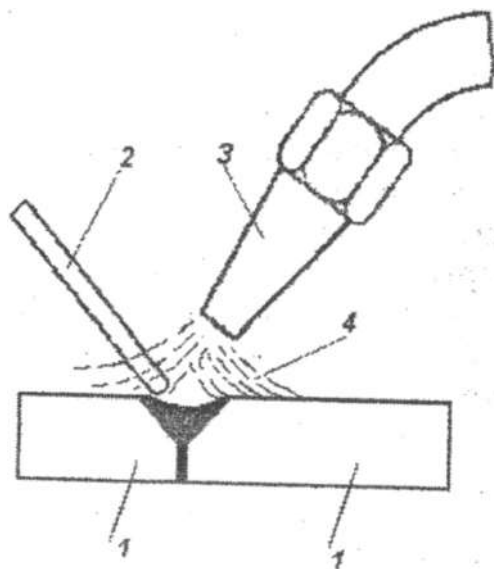


Рис. 8.6. Схема газовой сварки армированной шамотной плиткой

При *газовой сварке* в качестве источника тепла, за счет которого происходит нагрев и расплавление кромок заготовок, используется пламя, образующееся при сгорании горючего газа в атмосфере кислорода.

Сущность процесса газовой сварки заключается в следующем. Заготовки 1 (рис. 8.6) располагаются на столе, обеспечивается фиксирование свариваемых кромок. К сварочной горелке 3 подводится с помощью резиновых шлангов ацетилен и кислород от баллонов и зажигается сварочное пламя 4. Одновременно в зону сварки подается присадочный металл 2 (сварочная проволока). По мере перемещения пламени сварочная ванна затвердевает, образуя сварной шов.

Сварочные материалы для газовой сварки: газы, присадочная проволока, флюсы.

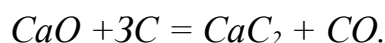
Кислород - газ без цвета и запаха - получают из воздуха путем глубокого охлаждения. При этом кислород переходит в жидкое состояние, а азот испаряется, т. к. имеет температуру кипения ниже, чем кислород. Транспортируется кислород в стандартных стальных баллонах емкостью 40 дм³, под давлением 150 кгс/см² (15 МПа), окрашенных в голубой цвет. Правила Гостехнадзора предусматривают окраску баллонов в условный цвет, присвоенный данному газу: кислород - голубой, ацетилен - белый, аргон - серый, углекислый газ - черный, водород - зеленый, другие газы - красный цвет. На верхней части баллона выбивают паспортные данные баллона: знак завода-изготовителя баллона, номер баллона, вес в кг, емкость в литрах, рабочее испытательное давление в кгс/см², дата изготовления и год следующего испытания, клеймо ОТК завода-изготовителя. На этой части баллона выбивают клеймо при последующих испытаниях, которые проводятся через пять лет. Для приближенного расчета количества кислорода в баллоне емкость баллона (дм³) умножают на давление газа в нем (кгс/см²). Пример: емкость баллона 40 дм³, давление 150 кгс/см². Количество кислорода в баллоне равно 40·150=6000 дм³ (при атмосферном давлении). Зная часовой расход газа при сварке, определяют, на сколько часов работы хватит этого количества газа.

При соприкосновении сжатого газообразного кислорода с пленкой масел и жиров происходит самовоспламенение масел и взрыв баллона. Поэтому кислородные баллоны следует тщательно предохранять от загрязнений маслом. Особенно опасны пропитанные жидким кислородом вата, уголь, одежда, волосы: насыщенные кислородом, они легко загораются.

Горючие газы. Основным горючим газом при сварке и резке является *ацетилен* (C₂H₂). Все остальные газы (пропан, природный газ, водород, нефтяные газы, пары бензина или керосина) являются *газами-заменителями*, т. к. ацетилен дает самую высокую температуру пламени (3150-3200 °С).

Ацетилен не имеет цвета, но обладает резким неприятным характерным запахом. Чистый ацетилен является взрывоопасным. Смеси ацетилена с воздухом способны взрываться, если содержание ацетилена в смеси с воздухом в пределах 2,2-100 % (по объему).

Технический (сварочный) ацетилен получают из карбида кальция путем разложения последнего водой. Карбид кальция получают путем сплавления в дуговых электропечах кокса и обожженной извести по схеме:



Карбид кальция (CaC₂) представляет кускообразное вещество темно-серого или коричневого цвета. При разложении 1 кг карбида водой получается практически от 230 до 280 дм³ ацетилена и известь по схеме: CaC₂ + 2H₂O = C₂H₂ + Ca(OH)₂. Количественное соотношение реагентов:

Карбид кальция 1кг+Вода 0,562кг→Ацетилен 0,406кг+Гашеная известь 1,156

Наполнение, хранение и транспортировка ацетилена в обычных баллонах недопустима из-за возможности взрыва ацетилена, находящегося в баллоне под давлением, или в смеси с воздухом. Поэтому, чтобы обеспечить безопасность, баллоны заполняют древесным углем (или пемзой, инфузорной землей, другой пористой массой) в количестве 290-320 г на 1 дм³ емкости баллона. Массу в баллоне пропитывают ацетоном (225-300 г на 1 дм³ емкости баллона). Ацетилен в больших количествах растворяется в ацетоне и становится безопасным.

Сварочная (присадочная) проволока. При газовой сварке применяют проволоку, близкую по химическому составу к свариваемому металлу, т. е. такую же, что и для дуговой сварки. Диаметр проволоки выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла. Для сварки меди, латуни, алюминия и его сплавов применяют проволоку из цветного металла соответствующей марки. Чугун и бронзы сваривают при помощи прутков, отлитых из этих металлов. В чугунный пруток хорошо добавить кремний.

Флюсы служат для частичной защиты расплавленного металла от окисления кислородом воздуха и, главное, для удаления образующихся окислов.

Составы флюсов выбирают в зависимости от состава и свойств свариваемого металла. Флюс должен плавиться раньше, чем свариваемый металл, и хорошо растекаться по шву. В качестве флюсов используют прокаленную буру, борную кислоту, кремниевую кислоту и ряд других веществ.

При сварке углеродистых сталей флюсы не применяют, так как в данном случае сварочное пламя хорошо защищает металл от окисления. Чугуны, хромистые и хромоникелевые стали, медь и ее сплавы, алюминий и его сплавы, магниевые сплавы необходимо сваривать с применением флюсов.

Оборудование для газовой сварки

Ацетиленовые генераторы (газогенераторы) - это аппараты для разложения карбида кальция водой с целью получения газообразного ацетилена (рис. 8.7).

Согласно ГОСТ 5190-67, ацетиленовые генераторы классифицируются следующим образом:

по производительности: 0,5; 0,75; 1,25; 2,5; 3; 5; 10; 20; . . . 320 м³/час ацетилена;

по способу устройства: передвижные и стационарные;

в зависимости от системы взаимодействия карбида кальция с водой:

"карбид на воду", "вода на карбид", "вытеснения", "комбинированные" (вода на карбид и вытеснение), "сухие";

в зависимости от давления вырабатываемого ацетилена: низкого давления - до 0,1 кгс/см²; среднего давления - от 0,1 до 1,5 кгс/см².

На пути следования ацетилена от генератора к сварочной горелке устанавливают *водяной затвор* для предотвращения взрыва ацетилена в газогенера-

торе при обратном ударе пламени. Обратный удар возникает, когда скорость истечения газов становится меньше скорости их горения. Практически это происходит при перегреве горелки и засорении сопла или центрального отверстия инжектора. Для газов-заменителей ацетилена применяются для этой цели обратные клапаны.

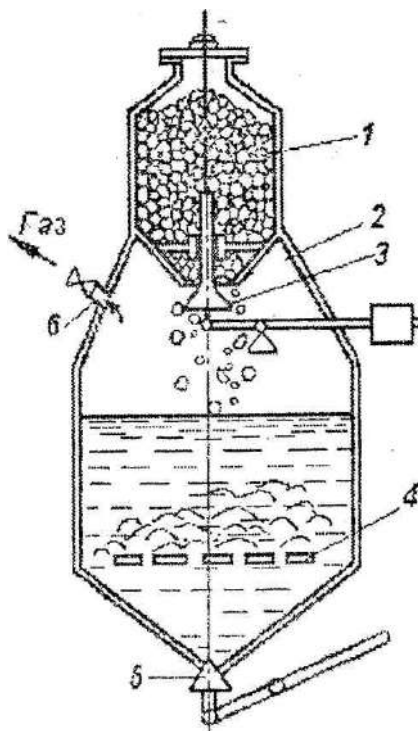


Рис. 8.7. Схема ацетиленового генератора системы "карбид в воду":
1 -бункер, 2 -газообразователь, 3 -питатель, 4 - решетка, 5 - спуск ила, 6 - отбор газа

Сварочные горелки бывают инжекторные и безинжекторные. Наибольшее применение находят *инжекторные горелки*, рис. 8.8, которые предназначены для сварки черных и цветных металлов толщиной от 0,5-30 мм. Кислород из баллона подается к вентилю 5 и через него в инжектор 4. Вытекая из инжектора с большой скоростью в смесительную камеру 3, струя кислорода создает разрежение, вызывающее подсос ацетилена. Ацетилен поступает по шлангу через ниппель 6 и вентиль 7 в смесительную камеру. Смесь по трубке 2 выходит из сменного наконечника 1 и поджигается.

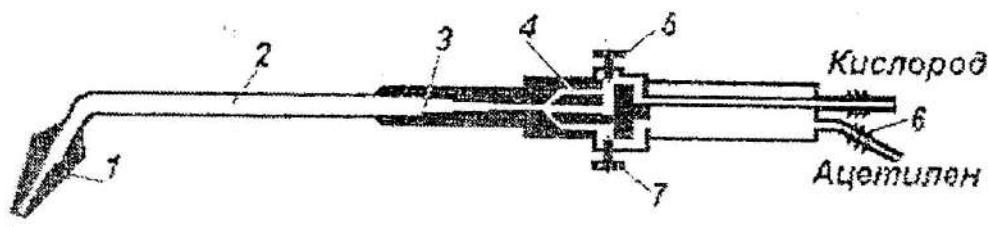


Рис. 8.8. Схема инжекторной горелки

Виды, свойства и регулирование сварочного пламени

Строение, температура и свойства сварочного пламени зависят от соотношения кислорода и ацетилена в горючей смеси. Различают три вида кислородно-ацетиленового пламени (рис. 8.9):

1) *нейтральное пламя* (его называют также *нормальным* или *восстановительным*) показано на рис. 5.23, б. Оно получается при соотношении $O_2:C_2H_2 = 1:1,2$.

Таким пламенем сваривают большинство металлов и сплавов;

2) *науглероживающее пламя* получается при соотношении $O_2: C_2H_2 < 1$, т. е. при избытке ацетилена (рис. 8.9, а). Такое пламя применяют для сварки чугуна, наплавки быстрорежущей стали и твердых сплавов;

3) *окислительное пламя* образуется при соотношении $O_2: C_2H_2 > 1,2$, т. е. при избытке кислорода (рис. 8.9, в). Применяется при сварке латуней.

Строение нормального пламени представлено на рис. 8.10. Газосварочное пламя состоит из трех зон: ядра, рабочей (сварочной) зоны и факела пламени. *Ядро* - самая яркая часть пламени, состоит из кислорода и раскаленных продуктов разложения ацетилена. *Рабочая (сварочная) зона* имеет синеватое свечение и самую высокую температуру, состоит из продуктов горения ацетилена: H_2 и CO . Этой частью пламени нагревают и плавят металл при сварке. *Факел* пламени состоит из CO_2 , паров воды и кислорода воздуха. Эта часть пламени является окислительной, т. к. углекислый газ и пары воды при высоких температурах окисляют железо.

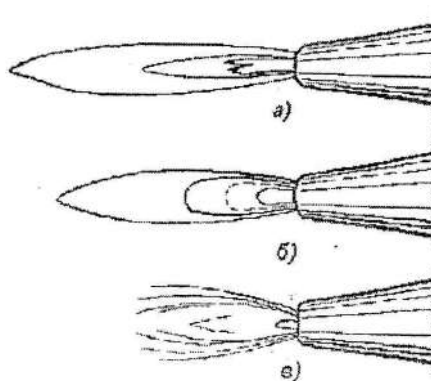


Рис. 8.9. Виды сварочного пламени

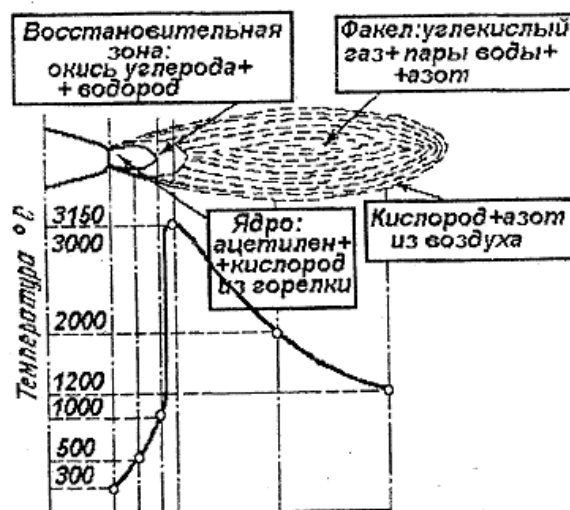


Рис.8.10. Строение нормального пламени и распределение температур

Технология газовой сварки

Качественный шов обеспечивается правильным подбором мощности горелки, вида сварочного пламени, способа сварки, угла наклона горелки, применением соответствующего присадочного материала и флюса.

Мощность сварочного пламени оценивают по расходу ацетилена A , который вычисляют по формуле:

$$A = K \cdot S,$$

где S - толщина свариваемых листов, мм; K - коэффициент; для углеродистой стали и чугуна $K = 100-120$; для нержавеющей стали $K = 70-80$; для меди $K = 160-200$; для алюминия $K = 75$. По мощности пламени определяют номер наконечника сварочной горелки. *Диаметр присадочной проволоки d* выбирают в зависимости от толщины S свариваемых листов. При толщине свариваемых листов $8 < 10$ мм можно пользоваться формулой:

$$d = 0,5 \cdot S + 1.$$

При толщине $8 > 10$ мм диаметр присадочного прутка принимают равным 5 мм.

Существуют два основных *способа газовой сварки*: правый и левый. При толщине металла менее 3 мм применяют *левую сварку*, при которой горелка движется вдоль стыка справа налево. Присадочный пруток находится слева от горелки. При толщине металла больше 5 мм применяют *правую сварку*: горелка движется слева направо. Правый способ обеспечивает некоторую термическую обработку выполненного соединения, поэтому его предпочтительно применять для сварки закаливаемых сталей любой толщины.

Угол α наклона горелки к свариваемой поверхности зависит от толщины свариваемого металла, рис. 8.11.

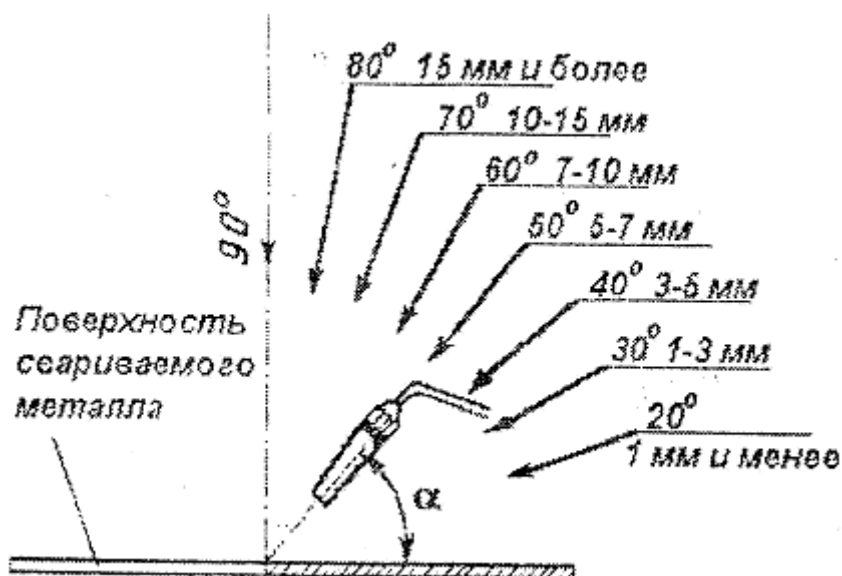


Рис. 8.11. Угол наклона горелки в зависимости от толщины металла заготовок.

Преимущества газовой сварки:

1. Способ обладает большой универсальностью, т. е. Позволяет сваривать черные, цветные металлы и их сплавы.
2. Способ позволяет регулировать температуру в широких пределах.
3. Сварка возможна во всех пространственных положениях,
4. Возможность производить подогрев свариваемых заготовок перед сваркой, в процессе сварки и после сварки.

Недостатки:

1. Большая околошовная зона нагрева и, следовательно, большие деформации и коробления.
2. При увеличении толщины свариваемых листов резко снижается производительность сварки и качество швов.
3. Взрывоопасность применяемых газов.
4. Требуется высокая квалификация сварщика.

Специальные виды сварки

Плазменная сварка

Существует четыре агрегатных состояния вещества - твердое, жидкое, газообразное и плазменное.

В газовой среде при повышенных давлениях и при высоких плотностях

тока от атомов отрываются не только внешние, валентные электроны, но и электроны внутренних орбит. Получается масса, состоящая из частично оголенных ядер и оторванных от них электронов, обладающая высокой температурой порядка 10000-50000 °С - *плазма*. Различают "горячую" и "холодную" (ненастоящую) плазму. При *плазменной сварке* применяется холодная плазма.

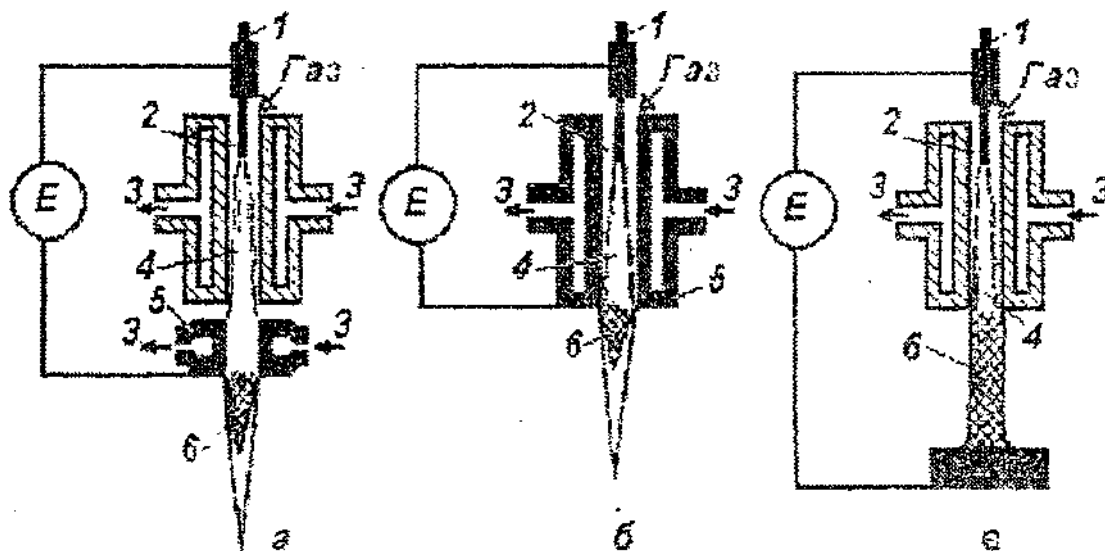


Рис. 8.12. Схемы дуговых плазменных головок

Плазменную струю получают с помощью плазменной горелки (*плазмотрон*), рис. 8.12. Горелка питается постоянным током 60-80 В прямой полярности от источника с падающей характеристикой. Дугу зажигают с помощью осциллятора. При этом дуговой разряд 4 возбуждается в канале 2 между электродом 1 из вольфрама и медным соплом 5, охлаждаемым водой 3 (рис. 8.12, а). Канал электрически изолирован от сопла и электрода. Вдоль дуги по каналу пропускают газ -аргон, гелий, азот, водород и пр. Газ проходит через сопло, сжимая столб дуги, ионизируется и выходит из сопла в виде ярко светящейся струи 6 (плазмы) с температурой 10000-50000 °С.

Различают плазмотроны с *раздельным соплом и каналом*, со струей, выделенной из столба дуги (*струя косвенного действия*), рис. 8.12, а; с *совмещенным соплом и каналом*, со струей, выделенной из столба дуги (*струя косвенного действия*), рис. 8.12, б; с *совмещенным соплом и каналом*, со струей, совпадающей с токоведущим столбом дуги (*струя прямого действия*), рис. 8.12, в.

В первых двух случаях плазменную струю (факел) используют как независимый источник теплоты с температурой до 16000 °С. Струя, совпадающая с токоведущим столбом дуги, используется для обработки только электропроводных материалов и имеет температуру до 30000-50000 °С.

В случае струи косвенного действия оператор обычно производит сварку "на весу" т. е. без применения подкладки под свариваемые кромки заготовок в зоне формирования шва. Сварку выполняют в основном без присадки, вручную

или автоматизированным методом. Следует отметить, что плазменная струя в связи с небольшим расходом газа и большой скоростью истечения, способствующей подосу воздуха, не обеспечивает достаточной защиты материала. Поэтому горелки снабжают вторым соплом, расположенным концентрически вокруг первого, для дополнительной подачи защитного газа. Недостаток аргона как одноатомного плазмообразующего газа заключается в его низкой теплостойкости, что обуславливает малую эффективную тепловую мощность плазменной дуги, особенно выделенной из столба дуги. Для получения мощной плазменной струи косвенного действия, используемой для резки, применяют двухатомные газы (водород или азот). Способность этих газов к диссоциации молекул в дуге обеспечивает перенос большого количества энергии из столба дуги на поверхность материала. Однако их применение приводит к быстрому износу электрода и сопла горелки. Поэтому эти газы используют в смеси с аргоном: аргон - как защитный газ, азот или водород - как плазмообразующие. Одним из очень важных параметров *режима* сварки струей прямого действия является зазор между соплом плазмотрона и кромками заготовок. Этот зазор тщательно регулируется и фиксируется.

Оборудование

Установки для плазменной сварки имеют источник питания дуги, плазмотрон, баллоны для плазмообразующего и защитного газов, аппаратуру для контроля и регулирования расхода газов, систему водяного охлаждения плазмотрона. Разработаны установки общего применения типа МПИ-3, МПУ-4, МПУ-5 и др. Каждая из них предназначена для сварки заготовок определенной толщины. Так, на установке МПИ-3 можно выполнять микроплазменную сварку заготовок толщиной от 0,05 мм до 1,0 мм, на установке МП-5 - сварку заготовок толщиной до 3-6 мм. В связи с этим каждая установка снабжена соответствующим плазмотроном (горелкой), позволяющим применять максимальный сварочный ток.

Преимущества:

Плазменная струя позволяет регулировать температуру факела в широких пределах. Высокая устойчивость процесса образования плазмы позволяет получать микроплазменную струю при токах до 0,5 А, которой можно сваривать металлы толщиной в несколько десятков микрон. Мощной концентрированной струей можно сваривать металлы толщиной 15 мм за один проход и резать металлы узким резом. Не требуется вакуум. Недостатки.

Быстро изнашиваются сопло и электроды плазмотрона. Для обработки различных толщин металлов требуются установки с разными параметрами (для каждой толщины - своя установка). Конфигурация швов и их расположение в пространстве ограничивается весом и габаритами плазмотрона.

Применение:

Плазменной струей можно сваривать, резать и наплавлять все металлы и их сплавы, а также полупроводники и диэлектрики. Особенно эффективна микроплазменная сварка тонколистовых заготовок из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, тугоплавких металлов и их сплавов (ниобий, молибден, титан, цирконий и др.). С помощью плазменной струи производят резку любых материалов, наплавку изношенных деталей, наплавку меди на сталь, жаростойких и коррозионностойких защитных покрытий. Плазменной струей можно испарять материалы. Конденсацией паров материалов, выходящих из плазменной струи, получают монокристаллы полупроводниковых материалов и чистых металлов, таких, как вольфрам, молибден, ниобий и др. Плазменную струю можно использовать для получения тонких металлических нитей очень высокой прочности.

Электронно-лучевая сварка

При *электронно-лучевой сварке* нагрев металла производится *электронным лучом* - сжатым потоком электронов, быстро перемещающимся в сильном электрическом поле.

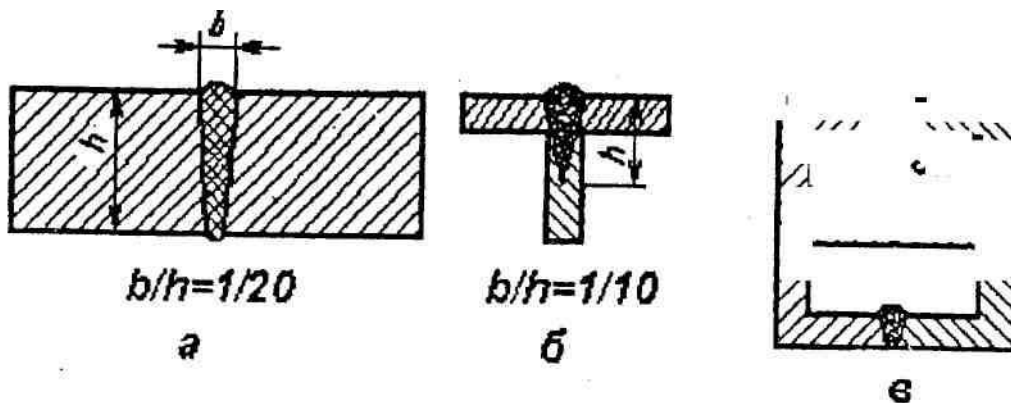


Рис. 8.13. Тип сварочных соединений, выполняемых электронно-лучевой сваркой

Известно, что при использовании обычных сварочных источников (дуга, пламя) металл нагревается с поверхности и тепло распространяется в стороны и вглубь в виде полукруга. Электронный луч проникает в металл на глубину в несколько миллиметров, и теплота выделяется в самом металле, причем наиболее интенсивно на некоторой глубине под его поверхностью, рис. 8.13.

Отношение глубины проплавления h к ширине шва b может достигать 20:1; такое проплавление называется *кинжальным*, рис. 8.13, а, б. Такая форма шва и небольшое, сконцентрированное на малой площади, количество теплоты, вводимой в сварное соединение, резко уменьшает возможность деформации, долю наплавленного металла и опасных структурных превращений в около-

шовной зоне.

Для ограничения размеров нагрева зоны термического влияния, а также при сварке легко испаряющихся металлов осуществляют подачу тока короткими мощными импульсами с частотой от 1 до 3000 Гц и продолжительностью от 0,01 до 0,00005 с.

Оборудование

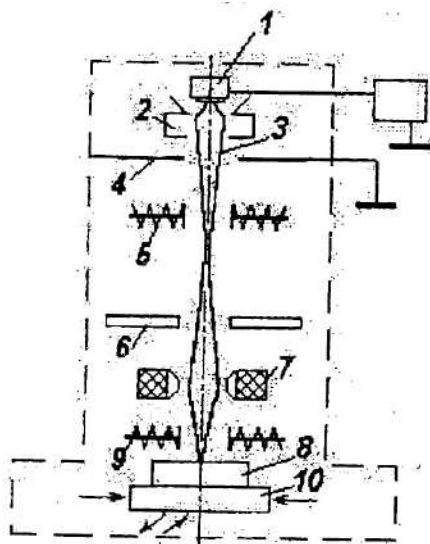


Рис.8.14. Схема электронно-лучевой сварки

Установка для электронно-лучевой сварки состоит из вакуумной камеры, в которой поддерживается в процессе сварки вакуум 10^4 - 10^5 ммрт. ст. ($133 \cdot 10^4$ - $133 \cdot 10^5$ Н/м²), и *электронной пушки* - генератора электронного луча (рис. 8.14). Пушка имеет вольфрамовый катод 1, заключенный в кольцеобразный формирующий электрод (цилиндр Венельта) 2, и расположенный под ним дисковый анод 4 с центральным отверстием для пропускания электронного луча 3 от катода к заготовке 8, закрепленной на столе 10. К полюсам сварочной установки подводится высокое напряжение (от 10 до 150 кВ), ток постоянный небольшой силы (35-1000 мА). При нагреве катода 1 с его поверхности излучаются электроны и со скоростью, соизмеримой со скоростью света, под действием большой разности потенциалов устремляются к аноду 4. Магнитное поле котировочных катушек 5 направляет луч по оси пушки. Диафрагма 6 отсекает энергетически малоэффективные краевые зоны луча. Магнитная линза 7 фокусирует (сжимает) луч до диаметра 0,01-1,2 мм на поверхности заготовки.

Скорость сварки определяется скоростью перемещения заготовки в камере под неподвижным лучом или отклонением самого луча с помощью отклоняющей системы 9. Оптическая система, состоящая из зеркала, объектива с осевым отверстием и микроскопа, позволяет вести наблюдение за процессом сварки при многократном увеличении (или с помощью телевизионной системы).

В зависимости от величины напряжения между катодом и анодом (так на-

зываемое ускоряющее напряжение) различают два типа электроннолучевых пушек: *низковольтные*, с ускоряющим напряжением 10-30 кВ, и *высоковольтные*, с ускоряющим напряжением до 150 кВ. Кроме того, пушки бывают *длиннофокусные*, с фокусным расстоянием 300-500 мм. В этом случае изделие не является элементом электрической цепи, т. е. становится возможна обработка диэлектриков. Существуют также *короткофокусные* пушки (фокусное расстояние 30-40 мм), в которых анодом является само изделие. Эти пушки имеют меньшие размеры. Такими пушками можно сваривать только электропроводные материалы.

Преимущества:

Благодаря идеальной защите от вредного влияния воздуха обеспечивается высокая чистота металла и качество сварки. Можно сваривать за один проход узким (кинжальным) швом заготовки толщиной до 200 мм без разделки кромок при скорости сварки до 100 м/час. Хороший внешний вид сварного соединения (зеркальная поверхность). Возможность сварки через узкие отверстия в недоступных местах (рис. 8.14, в).

Недостатки:

Дорогое и сложное оборудование; размер свариваемых заготовок и оперативное управление процессом сварки ограничено вакуумной камерой; низкая производительность процесса из-за того, что много времени, нужно для получения высокого вакуума; требуется биологическая защита персонала от рентгеновского излучения, возникающего при соударении электронного пучка с твердой поверхностью изделия.

Сварка лазерным лучом

Для *лазерной сварки* и других видов обработки материалов применяют оптические квантовые генераторы -*лазеры*, дающие световые лучи с высокой плотностью энергии. Квантовые генераторы преобразуют электрическую, световую, тепловую или химическую энергию в излучение электромагнитных волн: видимого (*лазеры*), инфракрасного (*мазеры*) или ультрафиолетового диапазона.

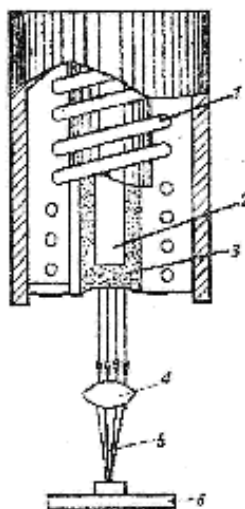


Рис. 8.15. Схема сварки лазерным лучом

Излучателем - активным элементом - могут быть как твердые вещества (рубин и др.), так и различные жидкости (растворы окиси неодима, красители и др.), а также газы и газовые смеси (водород, азот, аргон, углекислый газ и др.). Лазер может работать в импульсном или непрерывном режиме.

В квантовых технологических генераторах в качестве излучателя используется кристалл рубина (это AlO_3 , в котором небольшое количество атомов алюминия замещено атомами хрома). Лазер состоит из розового рубинового кристалла 2, ксеноновой лампы 1, являющейся нагнетателем энергии, охладителя 3, линзы 4 для фокусирования луча 5 диаметром в несколько микрон на поверхности изделия 6 (рис. 8.15). Для визуального наблюдения за процессом сварки служит стереоскопический микроскоп. Очень важной является защита глаз оператора от излучения. Для этого в микроскоп встроен затвор.

Преимущества:

Сварка лазером выгодно отличается от электронно-лучевой сварки тем, что может выполняться в любой среде - на открытом воздухе, в вакууме и т. д. Лазерная сварка более проста и безопасна, может быть использована в недоступных местах. Малая длительность импульсов и концентрированный луч позволяют уменьшить зону термического влияния до нуля.

Недостатки:

Низкий КПД использования энергии накачки (менее 2 %). При этом требуется мощное охлаждение установки. По этой причине лазер может работать только с длительными перерывами между импульсами (от 1 до 100 в минуту) для охлаждения в паузах.

Применение:

Широкое применение лазерная сварка находит в радиоэлектронике и

электронной технике при сварке контактов проводников с пленками на микрочипах, твердых схемах и электроэлементах. Лазерным лучом можно сваривать любые композиции металлов. Можно сваривать очень тонкие проволоки диаметром в несколько десятков микрон. С помощью лазера можно выполнять резку любых металлов и металлокерамических заготовок толщиной от 0,5 до 10 мм методом прямого испарения (узким резом); производить прошивку отверстий. Лазером можно получать отверстия диаметром до 5 мкм в металлах, рубине, алмазах, твердых сплавах. Такая резка и прошивка отличается высокой чистотой и точностью, может выполняться в любых пространственных положениях. При изготовлении изделий сложной геометрической формы используют системы перемещения с ЧПУ или управляемые ЭВМ.

На достаточно мощных установках непрерывного действия, с использованием в качестве излучателя углекислого газа можно сваривать стальные заготовки толщиной до 10-15 мм, накладывая непрерывные и прерывистые швы (типа точечной сварки).

Фотонная (световая) сварка производится с использованием световой энергии мощной электрической дуги с помощью фокусирования ее кварцевой линзой. При этом можно прожечь стальной лист. Световой луч может проходить значительные расстояния в воздухе.

Виды сварных швов

По *расположению швов в пространстве* различают швы: *нижние* (рис. 8.16, а), *горизонтальные* (рис. 8.16, б), *вертикальные* (рис. 8.16, в), *потолочные* (рис. 8.16, г).

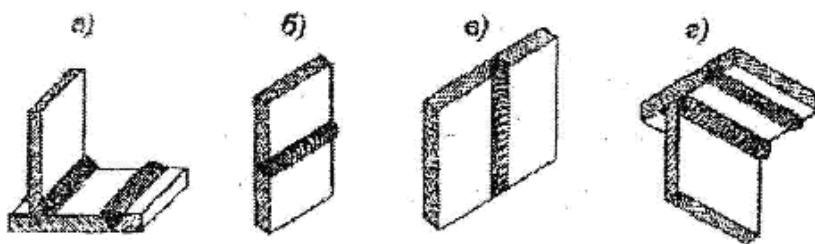


Рис.8.16. Расположение швов в пространстве

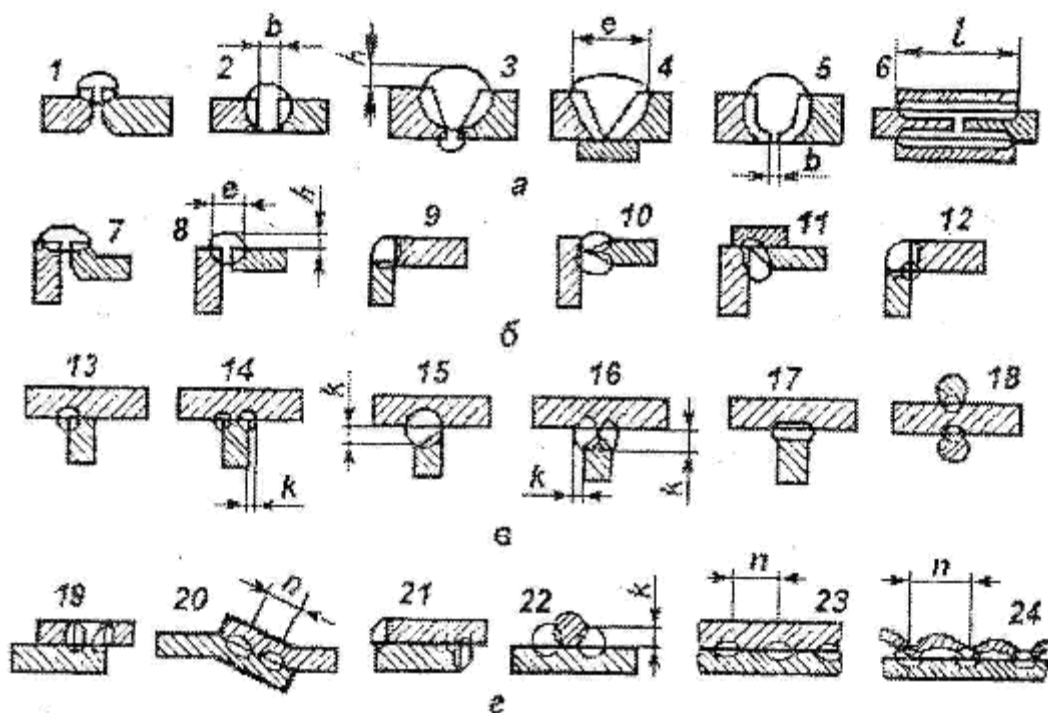


Рис.8.17. Виды сварных соединений

При сварке необходимо стремиться выполнять швы в нижнем положении, т. к. при этом обеспечивается лучшее формирование и качество шва. Потолочные швы требуют наиболее высокой квалификации сварщика.

По виду сварного соединения различают соединения: *стыковые* (рис. 8.17, а), *угловые* (рис. 8.17, б), *тавровые* (рис. 8.17, в), *нахлесточные* (рис. 8.17, г).

В зависимости от положения относительно действия внешних сил швы разделяются на *фланговые* 1, *лобовые* 2, *косые* 3 (рис. 8.18).

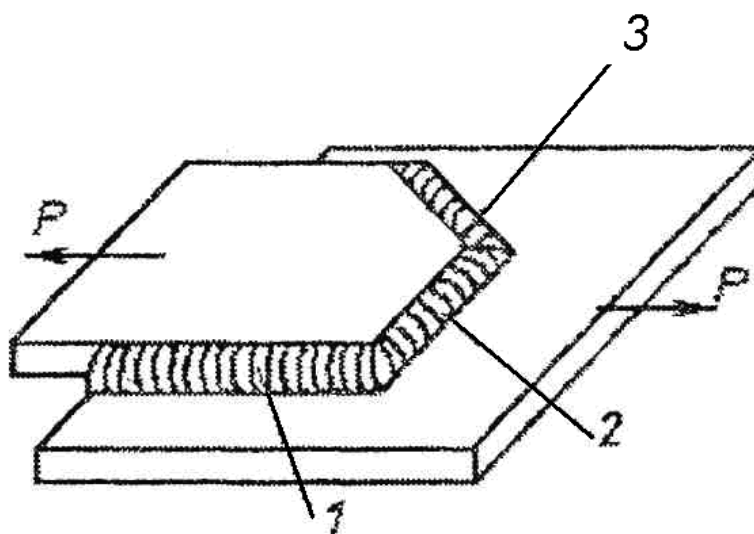


Рис. 8.18. Типы швов в зависимости от их положения относительно действия внешних сил

Основные виды дефектов сварных швов

Дефекты сварных швов разделяются на внешние и внутренние. К внешним дефектам относятся: нарушения установленных размеров и формы шва, наплывы (рис. 8.19, а), подрезы (рис. 8.19, б), наружный непровар (рис. 8.19, в), поверхностные трещины и поры (рис. 8.19, г), прожоги.

К внутренним дефектам относятся: газовая пористость и внутренние трещины (рис. 8.19, д), непровары (рис. 8.19, е), неметаллические включения (рис. 8.19, ж), образование крупного зерна из-за перегрева сварного соединения, пережог (окисление границ зерен).

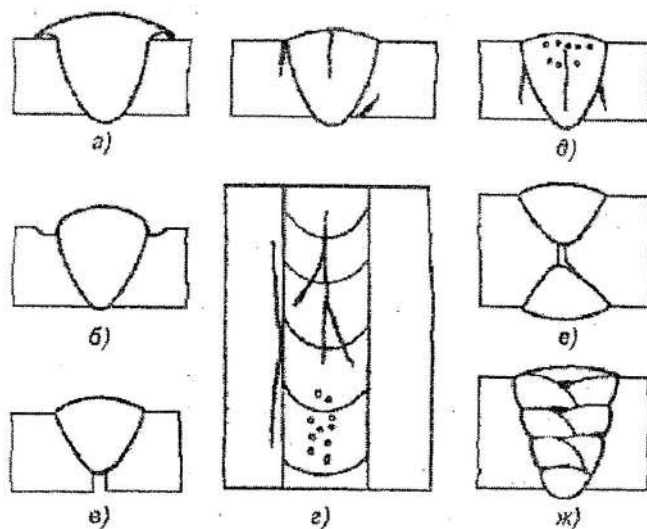


Рис. 8.19. Виды дефектов в сварных соединениях

Нарушение размеров и формы шва - эти дефекты при ручной сварке являются результатом низкой квалификации сварщика, плохой подгонки свариваемых кромок, неправильного выбора величины сварочного тока. *Наплывы* образуются из-за нарушения техники сварки, низкой квалификации сварщика, недоброкачественных электродов, несоответствия скорости сварки и величины сварочного тока. *Подрезы* - из-за большого тока, удлиненной дуги, неправильного положения электрода или горелки.

Непровары - из-за низкой квалификации сварщика, некачественной подготовки свариваемых кромок (малый угол скоса, отсутствие зазора, большое притупление)

Наружные трещины - из-за жесткой формы сварного соединения (например, пересекающиеся швы), неправильного теплового режима сварки, закрепления сварных заготовок.

Газовые поры - из-за загрязнений на свариваемых поверхностях (ржавчина, влага, масло и др.), отсыревших электродов и кромок, попадания воздуха в сварочную ванну, повышенного содержания углерода.

Перегрев и пережог - из-за неправильно выбранного режима сварки. *Не-*

металлические включения образуются при сварке малым сварочным током, при недоброкачественных электродах и флюсе, из-за загрязнений на свариваемых поверхностях. При неправильно выбранном режиме сварки шлак не успевает всплывать на поверхность и остается в металле шва в виде шлаковых включений.

Трещины в высокоуглеродистых и легированных сталях образуются вследствие напряжений, возникающих в металле от его неравномерного нагрева и структурных превращений. В этом случае требуется подогрев сварного соединения при сварке и отпуск сразу после сварки. Причиной возникновения трещин может быть также повышенное содержание в стали серы и фосфора. В этом случае следует увеличить долю наплавленного металла за счет высококачественной сварочной проволоки Св-08А.

Для получения сварных швов высокого качества следует тщательно изучить свойства свариваемого материала и составить наиболее целесообразный и технически правильный технологический процесс сварки (подготовка кромок, режим и техника сварки, электроды и флюсы, присадочный материал и другие параметры сварки).

Контроль качества сварки

Контроль качества сварных соединений включает контроль качества свариваемого металла, электродов, флюсов, газов. Производится также контроль технической исправности оборудования, квалификации сварщика, текущий контроль сварки на всех этапах производства изделия, проверка сварных соединений готового изделия. **Окончательный контроль готовых сварных соединений** осуществляется наружным осмотром, проверкой размеров швов, механическими испытаниями прочности соединений, испытаниями плотности шва, металлографическими исследованиями и контролем внутренних дефектов..

Механические испытания производятся на образцах, размеры и форма которых регламентированы, рис. 8.20. При испытаниях на растяжение на разрывной машине изготавливается образец (рис. 8.20, а) из основного или наплавленного металла. При этом определяются характеристики прочности и пластичности. Аналогично проводят механические

испытания на растяжение сварного соединения с вырезкой образца из пластины или трубы на плоском образце (рис. 8.20, б). Схема испытания на изгиб (рис. 8.20, в) проводится до образования первой трещины. Максимальный угол загиба 180° характеризует хорошую пластичность.

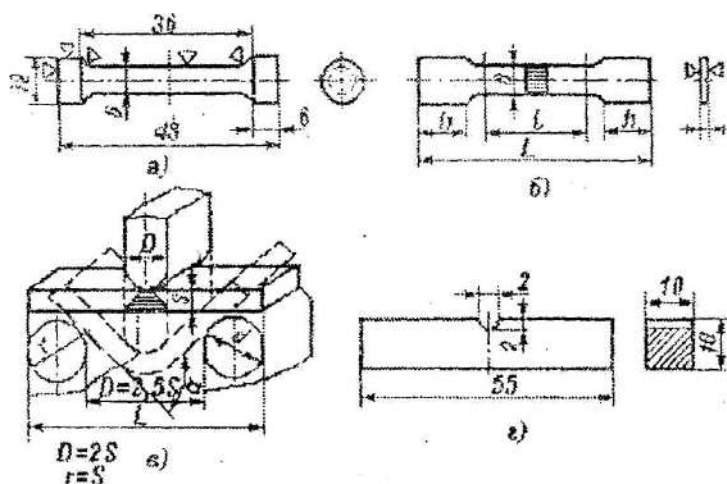


Рис. 8.20. Образцы для испытания механических свойств

Испытание на ударную вязкость проводят с надрезом по шву (рис. 8.20). Твердость сварного соединения определяют обычно на закаливающих сталях.

Металлографические исследования включают макро- и микроструктурный анализ. При макроструктурном анализе исследуют изломы, а также визуально видимые дефекты на макрошлифах, протравленных 25-процентным раствором азотной кислоты. При микроструктурном анализе исследуется структура на микрошлифах, протравленных 4-процентным раствором азотной кислоты. Исследование ведется с помощью металлографического микроскопа и позволяет определить не только дефекты металла, но и дефекты режима сварки.

Коррозионные испытания сварных соединений проводятся в средах с моделированием условий эксплуатации изделия.

Гидравлические испытания производятся с целью проверки плотности швов и прочности. При испытаниях создают давление на 2 атм (кгс/см^2) выше рабочего и выдерживают 5 мин. Места, в которых обнаружена течь, отмечают мелом, вырубают и снова заваривают.

Пневматические испытания выполняются сжатым воздухом только при рабочем давлении. Дефекты обнаруживаются с помощью покрытия швов мыльным раствором или погружения изделия в воду. В целях безопасности пневматическое испытание производят только после предварительного гидравлического испытания сосуда.

Керосиновая проба является удобным, надежным и широко распространенным методом контроля плотности швов (корпуса судов, резервуары, баки, контейнеры и т. п.). Для этого шов с одной стороны покрывают белой краской (порошок мела и вода), а с другой - смазывают керосином. Керосин способен проникать через самые мелкие поры диаметром в несколько микрон и выявляется в дефектном участке в виде темных пятен на фоне белой краски. Способ не требует ни оборудования, ни квалификации.

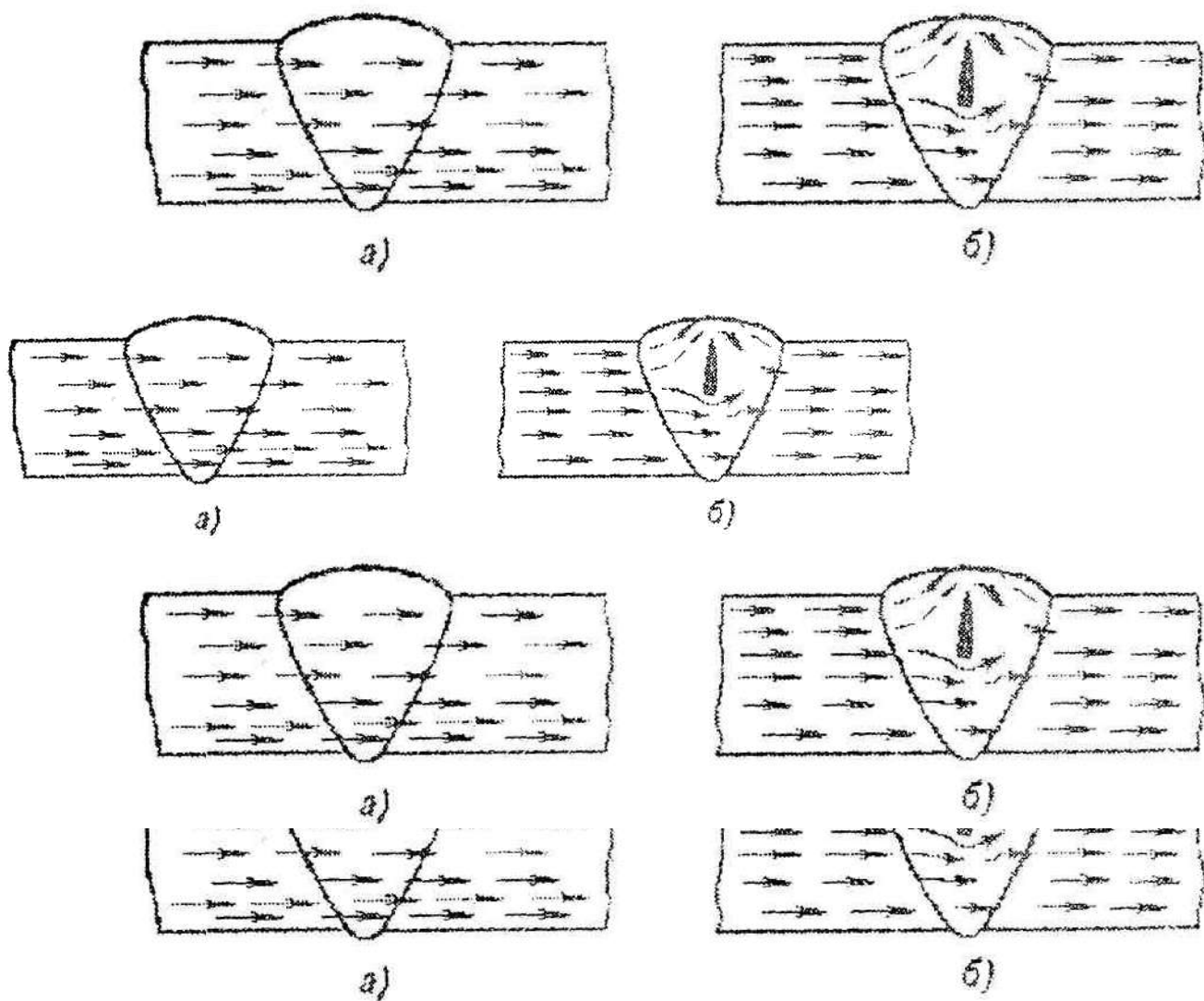


Рис. 8.21. Путь линий магнитного потока при прохождении через сварной шов:
а - без дефектов, б - при наличии дефекта

Магнитный контроль основан на намагничивании сварных соединений и обнаружении полей магнитного рассеивания на дефектных участках. Существует несколько разновидностей метода. При *методе магнитного порошка*, нанесенного на шов, дефект определяют по скоплению порошка (окалины). При *индукционном методе* магнитный поток в изделии наводят электромагнитом переменного тока. Рассеяние поля обнаруживают с помощью искателя (рис. 8.21).

При *магнитографическом методе* на шов накладывается и прижимается ферромагнитная лента, на которой фиксируется магнитное изображение шва. Затем это изображение воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки, рис.8.22.

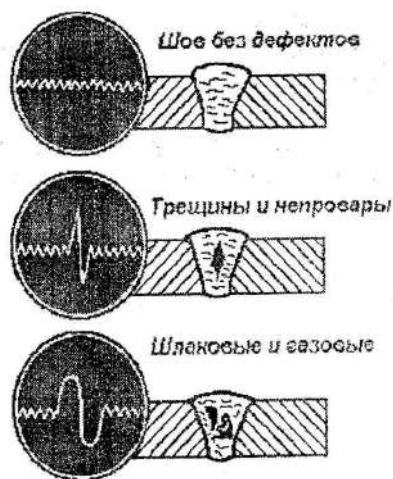


Рис. 8.22. Магнитографический метод контроля включения

Рентгеновское просвечивание основано на способности рентгеновских лучей проникать через металлы (рис. 8.23). Выявление дефектов происходит за счет того, что участки металла с дефектами и без дефектов по-разному пропускают излучение. Рентгеновские лучи, проходя через сварной шов, фиксируют дефекты в виде темных пятен. Применяемые в промышленности рентгеновские аппараты позволяют просвечивать сварные соединения из стали толщиной до 200 мм, алюминия-до 300 мм, меди-до 25 мм. При этом обнаруживается большинство дефектов: крупные трещины, непровары и шлаковые включения.

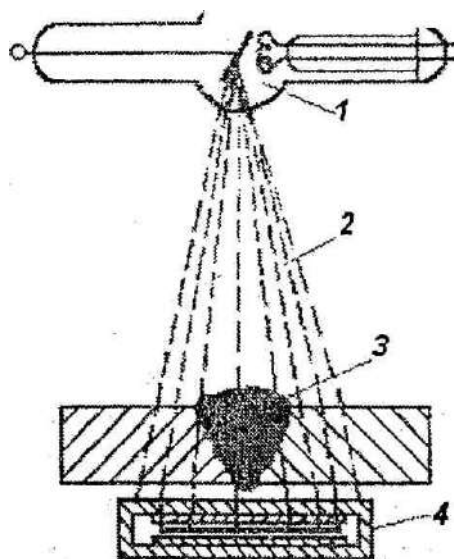


Рис. 8.23. Рентгеновское просвечивание сварного шва:

1 - рентгеновская трубка, 2 - излучение, 3 - шов, 4 - кассета с фотопленкой

Просвечивание сварных соединений гамма-лучами. При этом источниками излучения служат радиоактивные изотопы: кобальт-60, тулий-170, иридий-192

и др. Ампулу с радиоактивным изотопом помещают в свинцовый контейнер. Техника просвечивания подобна рентгеновскому методу. Преимущество: дешевизна, простота, возможность применения в труднодоступных местах и в полевых условиях.

Ультразвуковой контроль основан на способности высокочастотных, (свыше 20000 Гц), не воспринимаемых человеческим ухом, ультразвуковых волн проходить через большие толщины металла, отражаясь от поверхности раздела двух сред (металл-дефект), рис. 8.24. Ультразвук вводят в изделие под углом к поверхности металла. При встрече с дефектом ультразвуковая волна отражается и фиксирует на экране осциллографа наличие дефекта.

Промышленные установки позволяют обнаруживать дефект на глубине до 2500 мм. При этом можно выявить трещины, непровары, шлаковые включения размером 1-2 мм². Ультразвуковой метод, выявляя наличие дефекта и даже место его расположения, не позволяет установить его вид.

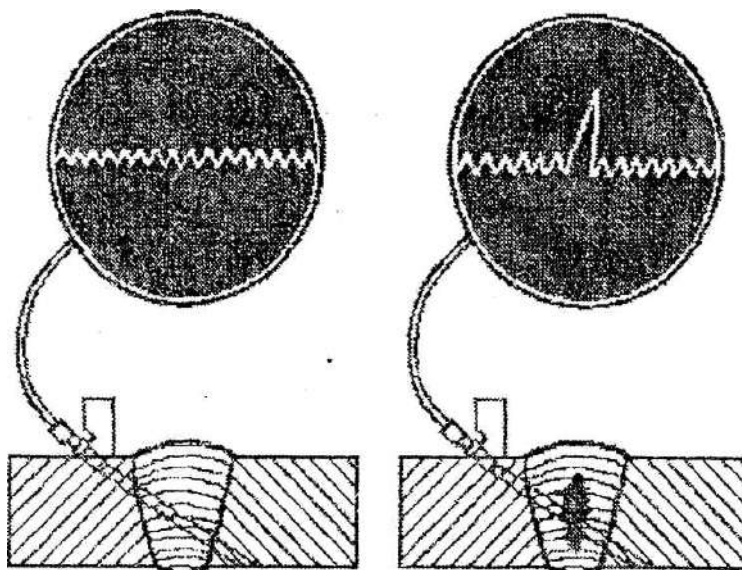


Рис.8.24. Ультразвуковой контроль

ГЛАВА 9. НАПЛАВКА И НАПЫЛЕНИЕ

9.1. Вибродуговая наплавка

Вибродуговая наплавка металла в струе охлаждающей жидкости является прогрессивным методом, позволяющим без коробления деталей получать слой требуемой толщины и твердости.

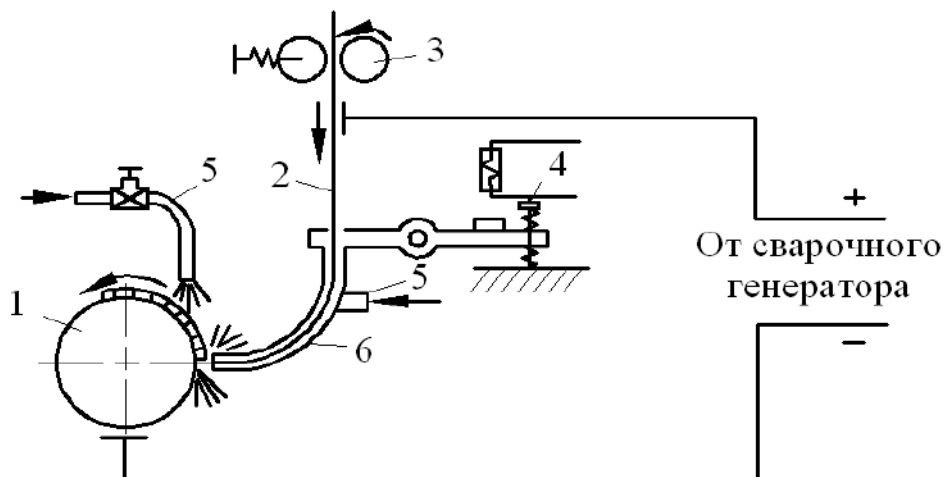


Рис. 9.1. Схема установки для вибродуговой наплавки: 1 – деталь;
2 – электродная проволока; 3 – ролик подачи проволоки; 4 – вибратор;
5 – трубка для подвода охлаждающей жидкости; 6 – вибрирующий хоботок

При этом способе физико-механические свойства и химический состав основного металла детали почти не изменяются в процессе наплавки, так как процесс протекает при слабом нагреве на глубину 0,1-2 мм зоны восстанавлива-

емой поверхности. Наплавленный слой приваривается к основному металлу так же, как и при обычной электросварке. Температура изделия в процессе наплавки находится в пределах 40-80°, что позволяет наплавлять термически обработанные и сложные по конфигурации тонкие и тонкостенные детали. Эти свойства особенно важны при восстановлении деталей горношахтных машин, изготовленных в большинстве своем из углеродистых и легированных сталей с последующей термической обработкой.

Сущность вибродуговой наплавки заключается в том, что к восстанавливаемой детали (рис. 9.1), которая вращается в патроне или в центрах токарного станка, и к электроду в виде вибрирующей проволоки подводится напряжение от источника постоянного тока. При соприкосновении с деталью вибрирующая проволока плавится и покрывает поверхность наплавленным слоем. Протекает процесс весьма сходно с дуговой электросваркой.

Питание установки осуществляется постоянным током обратной полярности (плюс на электроде). Напряжение устанавливается в пределах 14-24 В. Потребляемый ток зависит от диаметра проволоки электрода, скорости ее подачи и колеблется от 120 до 300 А. Наплавка производится в струе охлаждающей жидкости, состоящей из 3-4%-ного водного раствора кальцинированной соды.

Вибродуговым способом можно наплавлять внутренние и наружные поверхности стальных деталей, а также шлицевых и шпоночных пазов. В качестве электрода применяется стальная проволока различных марок, диаметром от 0,5 до 2 мм. Подбором подачи электродной проволоки к детали и вдоль ее поверхности, а также скорости вращения детали достигается образование сплошного, слоя из приварившихся частиц. Минимальный диаметр наплавляемой детали при соответствующем подборе режимов наплавки составляет 8-10 мм.

Перед наплавкой детали очищаются от масла и грязи, а места, не подлежащие наплавке (отверстия, пазы, каналы), защищаются графитовыми или угольными вставками. При многослойной наплавке поверхность каждого слоя очищается стальной щеткой.

Толщина h (мм), наплавленного за один проход слоя, зависит от скорости наплавки, т. е. окружной скорости вращения детали v м/мин, от диаметра и скорости подачи электродной проволоки и других параметров. Скорость наплавки v может изменяться в пределах от 0,3 до 6 м/мин, а толщина h наплавляемого за один проход слоя металла – от 2 до 0,3 мм.

Зависимость между h и v при диаметре электродной проволоки 1,5-2 мм можно выразить следующей эмпирической формулой:

$$h = 2 - 0,85\sqrt{v - 0,3}, \text{ мм}$$

где v – скорость наплавки, м/мин.

Скорость вращения шпинделя станка в зависимости от диаметра D мм наплавляемой детали:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}, \text{ об/мин}$$

Решая совместно уравнения, получим:

$$n = \frac{450 \cdot (2 - h)^2 + 110}{D}, \text{ об/мин}$$

Величина продольной подачи головки при диаметре проволоки 1,5-2 мм устанавливается в пределах от 0,4 до 3 мм на один оборот в зависимости от скорости наплавки.

Производительность насоса для подачи охлаждающей жидкости 6-12 л/мин. В зависимости от конфигурации изделия, требуемой толщины наплавки, диаметра проволоки, и скорости вращения шпинделя скорость подачи проволоки $v_n = 0,3 \div 2$ м/мин.

Основной частью установки для вибродуговой наплавки является автоматическая головка, которая монтируется на суппорте токарного или другого станка с продольной подачей, позволяющей устанавливать деталь в патрон или центры для вращения в процессе наплавки. Питается электромагнитный вибратор и электродвигатель механизма подачи проволоки от источника переменного тока. Вместо электромагнитного вибратора применяются также механические вибраторы с эксцентриковым или кривошипно-шатунным механизмом, создающие около 300 колебаний в минуту.

Достигнутый уровень технологии вибродуговой наплавки позволяет уже теперь рекомендовать ее не только для восстановления изношенных деталей, но и в качестве технологического процесса при изготовлении новых деталей горношахтного оборудования.

Наплавка твердыми сплавами

Наплавка твердыми сплавами применяется в горной промышленности для уменьшения износа новых деталей и при восстановлении изношенных. Например, в горных комбайнах и врубовых машинах наплавкой твердым сплавом восстанавливаются изношенные зубья звездочек, брусья баров, рабочие поверхности утюгов, направляющих для утюгов и другие детали. Износостойкость наплавленных деталей обычно увеличивается в 2-3 раза, а иногда в 6-8 раз и даже более по сравнению с деталями из обычной углеродистой стали. Так, износостойкость наплавленных сталинитом чугуновых рифленых щек дробилок повышается в 16 раз.

Покрытие детали твердыми сплавами во многих случаях исключает необходимость применения легированных сталей для изготовления деталей. Технико-экономическая эффективность применения наплавки твердыми сплавами за-

висит от соответствующего подбора деталей для покрытия, условий их эксплуатации, а также в значительной степени от подготовки детали под покрытие и режима наплавки.

Процесс наплавки твердым сплавом осуществляется при помощи газосварочной горелки, электросварочной дуги ИЛИ индукционного нагрева.

Твердые сплавы для износостойких покрытий обычно подразделяются на несколько групп:

1) Зернистые, или порошковые сплавы (вокар и сталинит) представляют собой черную или сероватую сыпучую массу с зернами величиной 0,5-2,5 мм, состоящую из механической смеси нескольких металлов – вольфрама, хрома и других с углеродом. Наплавленный слой из этих сплавов является твердым раствором карбидов соответствующих металлов и железа.

Порошкообразный твердый сплав вокар используется для наплавки деталей, которые могут работать без последующей механической обработки и допускают по условиям работы наличие пор, раковин и трещин.

При наплавке сталинитом также возникает некоторое количество пор и раковин, а в отдельных случаях и сетки волосяных трещин. Вследствие малой стоимости, несложности процесса наплавки и высокой стойкости наплавленных деталей сталинит имеет широкое применение – им наплавливают детали, непосредственно соприкасающиеся с полезным ископаемым или породой и не требующие точной обработки шлифованием (зубки врубных машин, комбайнов и экскаваторов, щеки дробилок, козырьки ковшей, черпаков и т. п.). Твердость наплавленного сталинитом слоя повышается при отжиге при температуре 800-900 °С в закрытой печи.

2) Металлокерамические сплавы изготавливаются прессованием смесей порошков с последующим спеканием и представляют собой карбиды тугоплавких металлов (вольфрама, титана и др.), связанные кобальтом или никелем.

Карбиды входят в состав сплавов в количестве 82-94%. Так как карбиды имеют высокую твердость (по десятибалльной шкале Мооса 8-10), то и сплавы обладают весьма большой твердостью. В зависимости от назначения изделиям из металлокерамических сплавов придают определенную форму: пластинок для зубков врубных машин и комбайнов, пластинок для буров, резцов металлорежущих станковой т. п.

Сплавы, в состав которых входит карбид одного какого-либо тугоплавкого металла, называют однокарбидными. Из них применяют вольфрамо-кобальтовые сплавы ВК6, ВК8 и ВК12. Цифра здесь показывает процентное содержание кобальта в сплаве.

В состав двухкарбидных сплавов входят кроме карбидов вольфрама и карбиды титана. Двухкарбидные сплавы обладают меньшим коэффициентом трения по металлам, поэтому они более пригодны для обработки сталей. Из двухкарбидных сплавов применяют для оснащения резцов и зубков титано-вольфрамо-кобальтовые: Т5К10, Т15К6 и Т30К4.

3) Литые твердые сплавы изготавливаются плавкой в индукционных высо-

кочастотных печах тигельного типа и представляют собой прутки диаметром от 3 до 8 мм или пластины, полученные отливкой в земляных формах или кокилях. В состав этих сплавов входят кобальт, хром, вольфрам, углерод и в небольшом количестве марганец, кремний и железо. Сплавы имеют различную твердость (в зависимости от количества карбидов), высокое сопротивление изнашиванию, высокую вязкость и хорошую химическую стойкость.

В России выпускают в настоящее время литой сплав на вольфрамо-кобальтовой основе ВКЗ. Наряду с этим сплавом выпускают хромо-никелевые сплавы сормайт № 1 и 2, в которых отсутствует вольфрам и кобальт заменен железом.

Сплавы ВКЗ и сормайт № 1 успешно применяются для наплавки деталей, работающих в различных условиях. Детали, наплавленные этими сплавами, после механической обработки имеют чистую поверхность, без пор и раковин. Эти сплавы не поддаются отжигу и закалке, поэтому ими можно наплавливать детали, работающие при высокой (до 900° С) температуре, так как резкого понижения твердости и износостойкости при этом не происходит. Сплав сормайт № 2 по сравнению со сплавом сормайт № 1 более вязкий, вследствие чего его применяют для наплавки деталей, работающих с повышенной нагрузкой, толчками и ударами.

Твердый сплав сормайт № 1 при наплавочных работах может быть успешно заменен белым чугуном. Практика показывает, что износостойкость зубчатых колес, наплавленных белым чугуном, не ниже, чем наплавленных сормайтом №1: сварочные свойства белого чугуна даже выше, чем сормайта № 1. Белый чугун легко растекается по наплавленной поверхности.

Прутки из белого чугуна могут быть изготовлены двумя способами: обычной отливкой белого чугуна в металлические кокили (диаметр прутка 6-8 мм, длина 350-400 мм); оттяжкой куска белого чугуна в пруток при помощи ацетилено-кислородной сварочной горелки.

Наплавка твердых сплавов осуществляется электродуговым, газовым или комбинированным способами.

Металлизация напылением

Металлизация напылением осуществляется газовым или электрическим аппаратом-металлизатором, при помощи которого металл расплавляется, и в виде мельчайших частиц подается струей сжатого воздуха на специально подготовленную поверхность изделия.

Этим способом можно наносить сравнительно прочный слой почти любого металла на изделия из черных и цветных металлов, а также на дерево, пластмассы и другие материалы. Покрытие наносится толщиной от 0,3 до 10 мм (иногда и большей) в зависимости от назначения.

Преимущество металлизации напылением состоит в возможности наносить покрытие, не вызывая перегрева изделия, что выгодно отличает металлиза-

цию напылением от сварки (наварки).

Металлизация напылением применяется в следующих случаях:

1) при восстановлении изношенных деталей машин, преимущественно цилиндрической формы (например, шипов и шеек различных валов, шпинделей, штоков, втулок, подшипников скольжения и пр.);

2) при исправлении литейных дефектов (например, заделка раковин и трещин, устранение пористости и течи);

3) при восполнении недостающего веса для балансировки;

4) при защите от коррозии;

5) при повышении жаростойкости стали методом металлизации алюминием (алитирование);

6) при улучшении теплопроводности и электропроводности;

7) при защитно-декоративных покрытиях.

Применение покрытий металлизацией особенно эффективно для деталей крупных размеров. В этом случае стоимость металлизации составляет от 2 до 10% стоимости детали.

Основные свойства напыленных покрытий. Металлизированный слой имеет неоднородную структуру и состоит из нагромождения отдельных частиц неправильной формы, размер которых колеблется от 1 до 2 мк в зависимости от условий распыления.

Структура слоя резко отличается от структуры основного металла: она пористая, имеет значительное количество окислов и шлаковых включений, характеризуется слабой прочностью сцепления напыленного слоя с основным металлом и частиц между собой. Однако при совместной работе с основанием металлизированный слой хорошо противостоит всем видам статических нагрузок. Отслаивание и разрушение слоя происходят лишь тогда, когда деформация основного металла выходит за предел упругости, но такие нагрузки вообще не допускаются в деталях машин. Напыленные покрытия хорошо работают на сжатие.

Твердость металлизированного слоя обычно выше твердости исходного металла. Прирост твердости колеблется в широких пределах и у стальных покрытий составляет около 30-40%.

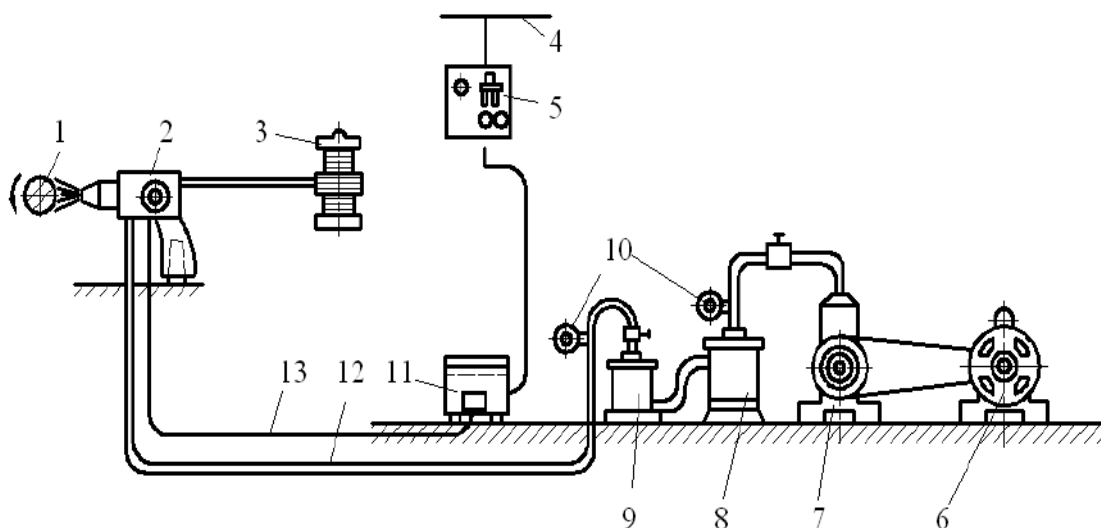


Рис.9.3.. Схема проволочной металлизационной установки: 1 – деталь; 2 – электрометаллизатор; 3 – катушка с проволокой; 4 – электросеть; 5 – щиток; 6 – электродвигатель; 7 – компрессор; 8 – воздухосборник; 9 – масловлаготделитель; 10 – манометры; 11 – трансформатор; 12 – шланг для сжатого воздуха; 13 – провода.

Износостойкость напыленных покрытий при сухом трении в два-три раза меньше, чем обычных металлов. При работе в условиях смазки металлизированные покрытия имеют более низкий коэффициент трения и большую износостойкость, чем обычные металлы. Этому способствует значительная пористость напыленного слоя, обладающего способностью впитывать масло в количестве около 9% своего объема.

Для нанесения распыленного металла на изделия обычно применяются специальные проволочные металлизационные установки (Рис. 9.3.) газовые или электрические. Были попытки применять аппараты, у которых исходным материалом для распыления служит расплавленный металл или порошок, однако эти аппараты вследствие серьезных недостатков не могут конкурировать с проволочными металлизаторами.

Подготовка металлизированной поверхности. Поверхность детали должна быть тщательно подготовлена к покрытию: 1) очищена от масла, пленки окислов и других загрязнений; 2) механически обработана для получения требуемой геометрической формы детали и необходимой толщины наращиваемого слоя (не менее 0,5 мм на сторону после окончательной обработки); 3) получена наибольшая шероховатость; 4) соседние участки детали, не подлежащие металлизации, должны быть защищены накладками из жести, картона или бумаги.

Необходимая шероховатость поверхности достигается механической, пескоструйной или электрической обработкой. Механическая обработка для цилиндрических деталей заключается в нарезании рваной резьбы с шагом от 0,8 до 1,2 мм. Шероховатость, созданная нарезанием рваной резьбы, дает наиболее высокую прочность сцепления. Пескоструйная обработка применяется для плоских деталей.

Толщина покрытия наружных поверхностей тел вращения может быть любой без ухудшения прочности сцепления. Предельной толщиной покрытий внутренних стенок цилиндров и втулок считаются 2,5-3,0 мм. При большей толщине повышается опасность возможного отслаивания под действием внутренних напряжений, возникающих в покрытии.

Электролитическое восстановление

Электролитическое наращивание металлов основано на законах электролиза, т. е. прохождения постоянного тока через электролиты. Этот процесс связан с передвижением электрически заряженных частиц – ионов. Ток поступает в электролит через проводники, называемые электродами. Под действием электрического тока, проходящего через электролит, ионы движутся в определенном направлении: положительно заряженные ионы, называемые катионами (металлы, водород), движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы – анионы (например, кислотный остаток SO_4 , водный остаток OH) движутся к аноду.

В процессе электролиза на катоде происходит разряд ионов металла, т. е. ионы теряют свой электрический заряд и осаждаются в виде нейтральных атомов. Электролитом служит раствор солей металла, который наращивается на изношенную деталь. Катодом является деталь, а анодом в большинстве случаев служат пластины из металла, подлежащего осаждению. Металл анода растворяется, а его атомы образуют новые ионы металла, переходящие в раствор взамен выделенных на катоде. Вместо растворимых анодов (медь, железо, никель и др.) применяются и нерастворимые (свинец, уголь), например при хромировании. В этом случае раствор соли по мере протекания процесса непрерывно обедняется и его необходимо периодически обогащать.

Электролиз металла подчиняется следующим законам Фарадея:

1) количество металла, осажденного на катоде при электролизе, прямо пропорционально количеству электричества (величине тока, умноженной на время), протекающего через данный электролит;

2) количество вещества, осажденного при прохождении тока через электролит, прямо пропорционально его эквивалентному весу.

Электрохимическим эквивалентом называется количество металла в граммах, которое осаждается в течение 1 ч при протекании тока в 1 А.

Оба закона Фарадея могут быть выражены формулой:

$$G = c \cdot I \cdot T, \text{ кг}$$

где G – теоретический вес осажденного металла, кг; c – электрохимический эквивалент, кг/А·ч; I – величина тока, А; T – продолжительность электролиза, ч.

Так как обычно электролитические растворы содержат не чистые растворы металлов, а с примесью токопроводящих солей и кислот, то действительный

вес осадка будет меньше теоретического. Отношение фактического веса осадка к теоретическому, выражаемое в процентах, называется выходом по току (КПД ванны). Выход по току при хромировании составляет 12-18%, а при других электролитических процессах 60-90%.

Осадки хорошего качества получаются только при определенном соотношении двух основных факторов – температуры раствора и катодной плотности тока, свойственных данному электролитическому процессу и избранному рецепту электролита. В настоящее время применяются следующие электролитические способы покрытия поверхностей: хромирование, оставливание (железнение), омеднение, никелирование, кадмирование, оцинкование, лужение, алюминирование, освинцевание. Большинство из упомянутых способов применяется для антикоррозионных и декоративных покрытий. Для восстановления и повышения износостойкости деталей используются главным образом хромирование и оставливание.

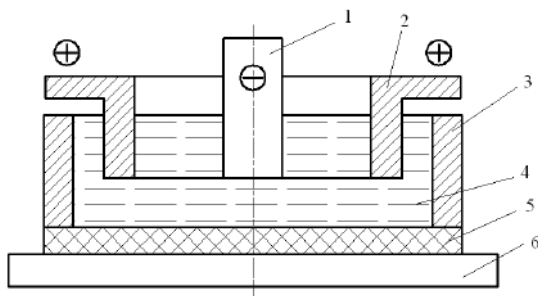


Рис. 9.4. Схема электролитического восстановления: 1 – восстанавливаемая деталь (катод); 2 – анод; 3 – ванна; 4 – электролит; 5 – листовой целлулоид; 6 – основание ванны

Химическое восстановление деталей

Химический способ применяют для повышения износостойкости деталей и защиты их от коррозии. Основные преимущества этого способа перед электролитическим: 1) процесс протекает при отсутствии тока, что не требует специального оборудования; 2) возможность получения высокой твердости покрытий (до HRC 60) и их высокая сопротивляемость абразивному изнашиванию; 3) возможность покрывать различные металлы, в том числе алюминиевые сплавы, пластмассы, керамику; 4) возможность нанесения равномерного износостойкого слоя на изделия сложной формы, например зубья червячных и других колес. Стойкость зубьев в результате химического никелирования повышается в 3-4 раза.

Раствор для химического никелирования содержит:

- хлористый никель – 25 г/л;
- гипосульфит натрия – 30 г/л;

- уксусно-кислый натрий – 20 г/л;
- глицин – 10 г/л.

Температура раствора 90-92 °С, скорость осаждения 0,02 мм/ч. Подготовка поверхности такая же, как и при электролитических процессах. После химического никелирования требуется закалка при температуре 400-450 °С. Износостойкость незакаленных никелевых покрытий невысокая. Рассмотренный метод можно применять для восстановления ответственных деталей, которые необходимо заменять даже при небольшом износе, например детали гидроредукторов и аппаратуры.

ГЛАВА 10. ПАЙКА МАТЕРИАЛОВ

Пайкой называют образование соединения с межатомными связями в результате нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации.

В качестве припоя при пайке используется металл или сплав с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов. Для удаления оксидов с поверхности паяемого материала и припоя и предотвращения их образования в процессе пайки применяется вспомогательный материал, называемый паяльным флюсом.

Свойство материалов образовывать паяное соединение при заданном режиме пайки называется паяемостью.

Процесс пайки металлов имеет много общего с процессом сварки плавлением. Однако пайка отличается от сварки следующими характерными особенностями.

1. Пайка производится при температуре ниже температуры плавления обоих или хотя бы одного из соединяемых металлов,
2. В процессе пайки между соединяемыми деталями в определенный момент находится жидкая металлическая прослойка припоя.
3. В отличие от сварки плавлением паяное соединение образуется не в результате непосредственного взаимодействия металлов соединяемых деталей, а вследствие взаимодействия припоя и основного металла.
4. Обязательным условием пайки являются смачивание паяемых поверхностей припоем, диффузия компонентов припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя и последующая кристаллизация жидкой прослойки.

Пайкой можно изготавливать сложные по конфигурации узлы и целые конструкции, состоящие из нескольких деталей, за один производственный цикл (нагрев), что позволяет рассматривать пайку (в отличие от сварки) как групповой метод соединения материалов и превращает ее в высокопроизводительный технологический процесс, легко поддающийся механизации и автоматизации.

Пайка уменьшает, а иногда полностью исключает остаточные напряжения и деформации. К числу очень важных преимуществ пайки следует отнести возможность соединения разнородных металлов, а также металлов с неметаллами. С помощью пайки можно получать неразъемные и разъемные соединения. Последнее очень важно в производстве радиоэлектронной аппаратуры, когда возникает необходимость демонтажа при настройке или замене дефектных приборов, установленных на печатной плате.

Возможность варьировать размеры соединяемых пайкой поверхностей (величины нахлестки) позволяет обеспечить равнопрочные с основным металлом соединения. При этом получается более благоприятная форма соеди-

нения с меньшей концентрацией напряжений, чем при контактной сварке.

Перечисленные выше преимущества пайки позволяют рассматривать ее как прогрессивный технологический процесс, находящий все более широкое применение в производстве.

10.1. Способы пайки

Современные способы пайки принято классифицировать последующим независимым признакам: удалению оксидной пленки, кристаллизации паяного шва, получению припоя, заполнению зазора припоем, источнику нагрева, наличию давления на паяемые детали, одновременности выполнения паяных соединений.

Классификация способов пайки по указанным признакам приведена на рис.10.1.

Особенности технологии пайки определяются количеством сталей определяется количеством содержащегося в них углерода и легирующих элементов. В зависимости от этого выбираются флюсы, назначаются способы и режимы пайки.

Углеродистые и низколегированные стали. Пайка сталей этого класса не вызывает особых трудностей и может осуществляться всеми известными способами: в печи, погружением в расплавленные соли, нагревом токами высокой частоты, газопламенной горелкой и паяльником. Подготовка поверхности, подлежащей пайке, заключается в зачистке напильником, шкуркой и обезжиривании в горячих щелочных растворах.

Для высокотемпературной пайки низколегированных и малоуглеродистых сталей применяют медь, латуни, медно-цинковые припои. Серебряные припои из-за дефицитности серебра применяют редко, в строго обоснованных и экономически оправданных случаях.

Флюсы, используемые для пайки сталей, содержат в своем составе буру, борный ангидрид, фтористые соли.

При низкотемпературной пайке углеродистых и низколегированных сталей применяют оловянно-свинцовые припои, пайка ведется паяльником, а в качестве флюса — раствор хлорида цинка или активированный спиртовой раствор канифоли.

Высоколегированные стали. Пайка этих сталей осложняется наличием на их поверхности термически и химически стойких оксидов хрома, титана и других легирующих элементов. Указанные оксиды ухудшают смачиваемость паяемых поверхностей припоями. Поэтому для пайки высоколегированных коррозионностойких сталей газопламенной горелкой используют активные флюсы.

Оксидная пленка, содержащая Cr_2O_3 , на коррозионностойкой стали восстанавливается в водородной среде при температуре около 1200 °С.

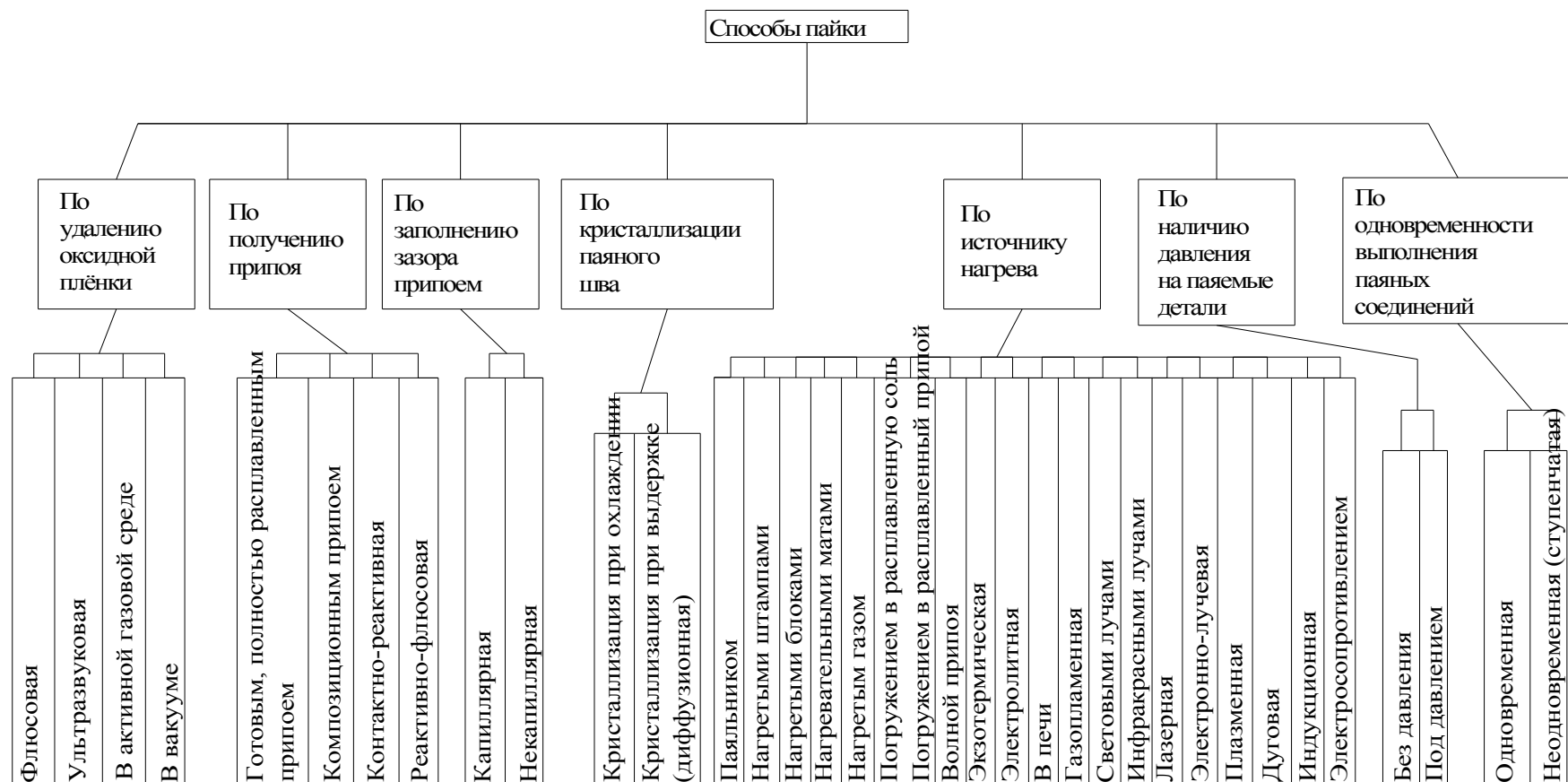


Рис. 29.22 Классификация способов пайки

Рис. 10.1. Классификация способов пайки

Низкотемпературная пайка коррозионностойких сталей осуществляется оловянно-свинцовыми припоями с флюсом, представляющим собой раствор канифоли в спирте с добавкой ортофосфорной кислоты. После пайки во избежание коррозии остатки флюса следует удалить.

Жаропрочные стали на своей поверхности также имеют трудноудаляемые оксидные пленки хрома, титана и ряда других элементов, входящих в состав сталей. Поэтому при пайке применяют высокоактивные флюсы, водородную атмосферу с добавками фтористых соединений. Для лучшего удаления оксидов хрома во флюсы вводятся тетраборат и фториды. Пайка жаропрочных сталей, как и коррозионностойких, может производиться в защитной атмосфере аргона, гелия с использованием одновременно и флюсов.

Пайка титановых сплавов

Процесс пайки титановых сплавов сопряжен с рядом трудностей, обусловленных их физико-химическими свойствами, прежде всего высокой химической активностью. Указанное свойство титановых сплавов требует при пайке обеспечения хорошей защиты металла от взаимодействия с воздухом, а также надлежащей подготовки под пайку. По тем же причинам непригодна при пайке газовая защита, содержащая водород или азот. Допустим лишь вакуум или аргон повышенной чистоты.

При выборе припоя и режимов технологического процесса пайки необходимо учитывать способность титана образовывать хрупкие интерметаллидные соединения, отрицательно влияющие на прочностные характеристики паяного шва, почти со всеми элементами, входящими в состав припоев. С серебром титан образует интерметаллид менее хрупкий, чем с остальными металлами. Поэтому чаще всего для пайки применяют припои на основе серебра.

Для повышения прочности и пластичности паяных соединений, повышения однородности паяного шва проводят диффузионную пайку титана или диффузионный отжиг. За счет диффузионного отжига удается получить прочность паяных соединений из титана, близкую к прочности основного металла.

В ряде случаев, особенно при пайке низкотемпературными припоями Si - Pb, поверхность титана под пайку покрывают металлами, улучшающими его смачиваемость. К таким металлам относят прежде всего никель, а также серебро, медь, олово. Покрытие осуществляется гальваническим путем, погружением деталей в расплавленный металл, например олово, нагретое до 700—750 °C.

Высокотемпературная пайка титана по покрытиям осуществляется с флюсами, которые обычно используют для пайки меди, никеля, серебра, спиртоканифольным бескислотным или спиртоканифольным, активизированным солянокислым диэтиламином.

Пайка алюминия, магния и их сплавов

Процесс пайки указанных металлов и сплавов на их основе осложняют тугоплавкие оксидные пленки на их поверхности, обладающие высокой химической устойчивостью и не удаляющиеся при гайке в высоком вакууме (до 0,1 МПа) и в восстановительных газовых средах.

Паяют детали из алюминия так называемой абразивной пайкой. Припой для низкотемпературной пайки (ПОС61) смешивают с асбестовой стружкой и прессуют в карандаш в простейших пресс-формах. Нагретую до температуры пайки деталь натирают этим карандашом. Асбест в процессе механического воздействия снимает оксидную пленку и образуемая чистая от оксидов поверхность тут же смачивается припоем. После такого лужения можно выполнять пайку, предварительно удалив остатки асбеста с поверхности.

Высокотемпературная пайка алюминия осуществляется всеми известными способами нагрева: газопламенным, индукционным, в печах, погружением в расплавленные соли.

Контактно-реактивная пайка в вакууме 1 МПа и в газовых средах позволяет соединять алюминий через прослойку кремния, меди, серебра. Флюсы в таких случаях не применяются. Перспективным методом бесфлюсовой высокотемпературной пайки алюминия являются пайка в атмосфере паров магния, создаваемой в вакууме 1 МПа. Атмосфера паров магния (вследствие большой химической активности магния к кислороду) не только восстанавливает оксидную пленку Al_2O_3 , но и служит средой, которая защищает поверхность основного материала от окисления в процессе пайки.

Детали из магниевых сплавов паяют паяльниками, горелками, индукционным нагревом, в расплавленных флюсах, в печах с контролируемой атмосферой (аргон, аргон с азотом, азот), в вакууме.

Низкотемпературная пайка магния осуществляется по предварительно нанесенному покрытию из меди, никеля или серебра. В таком случае припой выбирается применительно к металлу покрытия, например, оловянно-свинцовый.

В печах с контролируемой атмосферой азота, аргона или в вакууме паяют изделия из магния контактно-реактивным способом. Для этого поверхность под пайку покрывают слоем металла (меди, никеля), который образует с магнием легкоплавкую эвтектику при 723—873 К. С целью повышения стойкости магниевых сплавов против коррозии поверхность их после пайки часто анодируют. При определении оптимальных режимов пайки магниевых сплавов необходимо иметь в виду, что при 573—673 К происходит разложение гидроксидов магния, что приводит к образованию пористости.

Пайка меди и ее сплавов

Пайка меди и основных ее сплавов — латуней, бронз, медно-никелевых сплавов может быть осуществлена почти видами пайки при использовании об-

ширной номенклатуры припоев и флюсов. Однако каждый из указанных выше материалов имеют свои характерные особенности, которые влияют на технологию пайки, выбор режимов, оборудования и т. д.

Пайка тугоплавких металлов. Тугоплавкие металлы относятся к разряду труднопаяемых высокотемпературными припоями. Трудности пайки обусловлены особенностями их физико-химических свойств.

Низкотемпературная пайка тугоплавких металлов применяется очень редко и осуществляется оловянно-свинцовыми припоями с канифольсодержащими активированными флюсами по предварительно нанесенному никелевому покрытию.

Высокотемпературная пайка вольфрама нежелательна, так как при температуре выше 1300—1400°C он рекристаллизуется, теряет прочность, становится хрупким. В этом случае перспективой является пайка при низкой температуре с последующей диффузионной термообработкой. Применяют припои на основе никеля, титана, палладия и др.

Пайка разнородных металлов. При выборе припоев, способов нагрева, типов соединения необходимо учитывать:

1) степень различия физических свойств материалов и коэффициентов теплового расширения, теплопроводности и температуры давления;

2) особенности химических свойств — наличие оксидов, их химическую стойкость, окисляемость и активность по отношению к 1ким газам, как азот, водород;

3) характеристику смачиваемости различными припоями;

4) возможность и условия образования интерметаллидных прослоек.

При пайке конструкций из разнородных металлов неизбежно происходит изменение паяльного зазора из-за разности коэффициентов термического расширения. При большем коэффициенте термического расширения соединительный зазор, охватывающий детали, при нагреве может увеличиться настолько, что припой вытечет или не поднимается по капилляру. Если же деталь с большим коэффициентом термического расширения располагается внутри, то зазор при температуре пайки может уменьшиться и слой припоя окажется тонким, что приведет к разрушению при охлаждении или возникновению внутренних напряжений. Для предотвращения разрушения паяных соединений из материалов с разными коэффициентами линейного расширения следует применять припой, обладающий повышенной пластичностью, компенсирующей разницу в указанных свойствах, например припои на основе индия или чистый индий.

В тех случаях, когда припой плохо смачивает один из паяемых материалов или образует с ним хрупкие соединения, на него наносят покрытие гальваническим или химическим методом, обслуживанием, осаждением из газовой фазы, которое и обеспечивает пайку.

Пайка металла с неметаллами, например с керамикой, ферритом, производится по предварительно металлизированной поверхности.

Особенности конструирования паяльных соединений

Конструктивное оформление паяных изделий определяется условиями их эксплуатации, регламентированными техническими условиями.

Тип паяного соединения, его конструктивные параметры зависят от требований к прочности изделия, его массе, а также от характера нагрузок и направлений их действия.

Детали во избежание смещения при пайке должны быть зафиксированы друг относительно друга.

Типовые паяные соединения, встречающиеся в плоских паяных конструкциях, — это соединения внахлестку, встык, в тавр, в угол (рис 10.2, а, б, в, и). Предпочтительно применение соединения внахлестку, так как за счет увеличения частичного перекрытия взаимно параллельных поверхностей деталей (нахлестки) достигается его равнопрочность с основным металлом.

Остальные разновидности паяных соединений являются комбинациями названных выше и называются комбинированными.

Для устранения изгибающего момента, неизбежного в нахлесточном соединении, применяют ступенчатое соединение (рис. 10.2, д). Увеличить поверхность пайки можно при использовании таких соединений, как замковое (рис 10.2, г, е) гребенчатое (рис 10.2, ж), косостыковое (рис. 10.2, з), тавровое с отогнутой полкой (рис 10.2, л), встык с накладками (рис. 10.2, к).

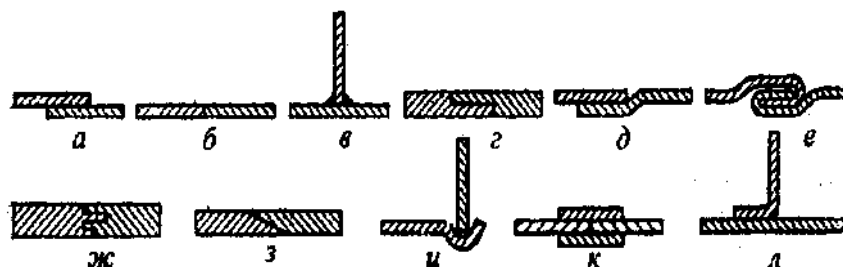


Рис. 10.2. Типы паяных соединений

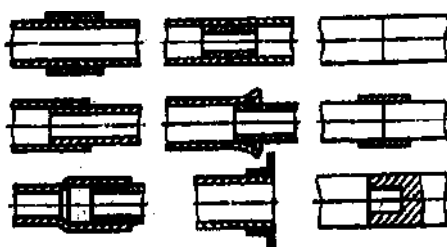


Рис. 10.3. Примеры паяных соединений труб и стержней

Соединения встык и в тавр (рис. 10.3, б, в) применяются крайне редко, так как равнопрочное они не обеспечивают и используются лишь в тех случаях,

когда конструкция не может быть выполнена иначе.

Некоторые другие соединения, характерные для пайки труб и стержней, приведены на рис. 10.3. В связи с тем, что паяный шов, как правило, имеет пониженную пластичность, следует так проектировать соединения, чтобы он не находился в зоне концентратора напряжений.

Прочность паяного шва в значительной степени зависит от расстояния между паяными поверхностями (паяльного зазора). Устанавливаемая величина паяльных зазоров, в свою очередь, находится в прямой зависимости от физико-химических свойств паяемых материалов и припоев.

При слишком малом зазоре припой может не заполнить паяный шов и прочность соединения, таким образом, будет ослаблена. При очень большом зазоре капиллярные силы перестают действовать, в шов не затечет достаточного количества припоя и прочность соединения также будет понижена. Зависимость предела прочности паяного соединения при срезе от величины зазора показана на рис. 10.4.

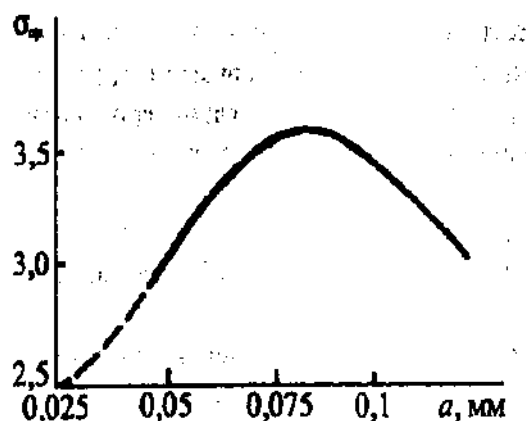


Рис 10.4. Предел прочности паяного соединения в зависимости от величины зазора (припой — ПОС-61, основной металл — латунь)

В паяемых конструкциях всегда возникают собственные напряжения. Они являются результатом неравномерного нагрева, фазовых и структурных изменений в металле, разных значений коэффициентов линейных расширений припоя, основного металла, а при пайке разнородных металлов — результатом разницы их коэффициентов линейных расширений. Эти напряжения вызывают деформации укорочения или изгиба конструкции после пайки, снижают прочность соединения, могут стать причиной разрушений при вибрационных нагрузках.

Одним из средств уменьшения внутренних напряжений является последующая термообработка. Она, естественно, является неэффективной для паяных конструкций из разнородных металлов, так как внутренние напряжения возникают вновь. В этом случае снизить величину внутренних напряжений можно рациональным проектированием соединений (исключением концентраторов,

применением в конструкциях согласованных по коэффициенту линейного теплового расширения материалов, увеличением толщины в зоне пайки металлической детали, расположенной снаружи).

В последнее время получили распространение следующие виды пайки:

1. Электронно-лучевая пайка. Электронно-лучевой нагрев применяется для локальной пайки, в том числе импульсной, пайки изделий электронной и радиотехнической промышленности, пайки деталей из тугоплавких металлов. Высокая концентрация электронного пучка существенно сокращает время нагрева и плавления припоя, что особенно важно при пайке чувствительных к нагреву тугоплавких металлов. Пайка может производиться как неподвижным сфокусированным лучом, так и сканирующим (совершающим, например, поперечные колебания). В качестве примера можно назвать пайку электронным лучом электрических выводов к контактным площадкам пленочных микросхем.

Электронно-лучевой нагрев эффективен при пайке металлокерамических узлов, сильфонных конструкций.

2. Лазерная пайка. Нагрев паяемых деталей с помощью лазера является весьма перспективным, особенно при пайке микроминиатюрных деталей, контактов и т. п. Лазерный нагрев в определенном отношении более универсален, чем электронно-лучевой: световой луч свободно проходит сквозь прозрачные преграды, не требуется электрического контакта с деталью, пайка возможна не только в вакууме, но и на воздухе или в защитной атмосфере. Высокая удельная тепловая мощность лазерного луча способствует испарению с поверхности припоя и основного металла оксидных пленок, что улучшает процесс пайки.

3. Газопламенная пайка. Для высокотемпературной пайки могут применяться газовые горелки, в которых тепловая энергия образуется в результате сгорания какого-либо горючего газа, например ацетилена C_2H_2 , в струе кислорода.

4. Плазменная пайка. При использовании плазменных горелок пайка осуществляется плазмой, образуемой в плазматроне. Плазменная горелка позволяет за счёт изменения силы тока, диаметра сопла регулировать в широких пределах как общее количество вводимой в детали теплоты, так и величину поверхности нагрева.

5. Пайка в нейтральной газовой среде. В качестве нейтральных газовых сред используют аргон, гелий, азот. Инертные газы предохраняют паяемый металл и припой от окисления в процессе пайки. Если же в пространство печи или контейнера, в которых ведется пайка, аргон постоянно подавать под некоторым давлением, т. е. пайку вести в проточной нейтральной среде, то часть кислорода вместе с воздухом вытесняется, и парциальное давление его в контейнере или печи становится меньше. Тем самым создаются условия для непрерывного самопроизвольного распада оксидов - диссоциации.

Чтобы активизировать нейтральные газовые среды, в них часто добавляют газообразные флюсы: фтористый водород (HF), трехфтористый бор (BF_3) и другие, которые, взаимодействуя с оксидной пленкой, способствует ее удале-

нию.

6. Пайка в вакууме. Бесфлюсовая пайка с применением разреженного газа при давлении ниже 10^5 Па называется пайкой в вакууме. При создании в печи или контейнере вакуума с определенной степенью разрежения парциальное давление кислорода становится ниже упругости диссоциации оксидов. Эти условия необходимы для диссоциации оксидов и предупреждения повторного окисления поверхностей паяемых деталей при нагреве в процессе пайки. В вакууме обычно паяют медь, никель, вольфрам, титановые сплавы, высоколегированные и жаропрочные стали. Сплавы, содержащие в своем составе значительное количество алюминия или хрома, при пайке в низком и среднем вакууме требуют дополнительного флюсования, так как оксиды алюминия и хрома очень устойчивы, имеют малое давление пара и начинают испаряться при высоких температурах, близких к температурам их плавления*.

7. Ультразвуковая пайка. Для удаления оксидов с поверхности некоторых металлов (например, алюминия) при низкотемпературной пайке применяют способ их ультразвукового разрушения. Он основан на свойстве упругих механических колебаний ультразвуковой частоты при прохождении через жидкости вызывать кавитацию. Ультразвуковые колебания создаются в расплавленном припое, нанесенном на паяемый металл специальным паяльником.

8. Пайка световыми лучами. При пайке световым лучом с помощью ламп обеспечивается нагрев с малой тепловой инерционностью. Так; для кварцевой лампы время достижения номинального энергетического Потока с момента ее включения составляет 0,6 с. Достоинством нагрева световыми лучами является бесконтактный подвод энергии, в том числе через оптически прозрачные стенки. С их помощью можно паять на воздухе, в инертной среде, вакууме, а также нагревать магнитные и немагнитные материалы, в широких пределах регулировать температуру нагрева, визуально наблюдать за процессом пайки. В зависимости от типа лампы, ее мощности, подводимого к ней напряжения, может быть получена температура от 1980 до 2930 °C.

ГЛАВА 11. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

Любая термическая обработка предполагает получение необходимых свойств сплава путем его нагрева до определенной температуры, некоторой выдержки и охлаждения с определенной скоростью.

Варьируя температуру нагрева и скорость охлаждения, можно по-разному изменить структуру сплава и получить различные свойства.

В зависимости от того, как изменяются свойства при термической обработке, можно различать упрочняющую термическую обработку, при которой повышаются твердость, прочность и износостойкость, и разупрочняющую обработку, повышающую пластические свойства, вязкость и снижающую твердость, прочность, сопротивление деформации.

В практике работы с металлом и изделиями из него широко применяют оба вида термической обработки.

11.1. Закалка стали

Закалка - это упрочняющая термическая обработка, преследующая цель таким образом изменить структуру стали, чтобы максимально повысить твердость и прочность. Принципиально это делается следующим образом.

Если взять эвтектоидную сталь (0,8% С) с перлитной мягкой структурой и нагреть ее выше точки S до точки 1 на диаграмме железо-углерод, то перлит превратится в аустенит (рис. 11.1). При этом в аустените (поскольку это твердый раствор) будет растворено все то количество углерода, которое имеется в стали, т. е. 0,8%.

Если затем быстро охладить сталь, то углерод не успеет выделиться из твердого раствора - аустенита и останется в нем после охлаждения. Кристаллическая же решетка аустенита изменится при охлаждении, т. к. это не диффузионный процесс и реализуется за счет сдвигов в решетке по определенным кристаллографическим плоскостям. Эти сдвиги при наличии напряжений идут практически при любых реальных скоростях охлаждения.

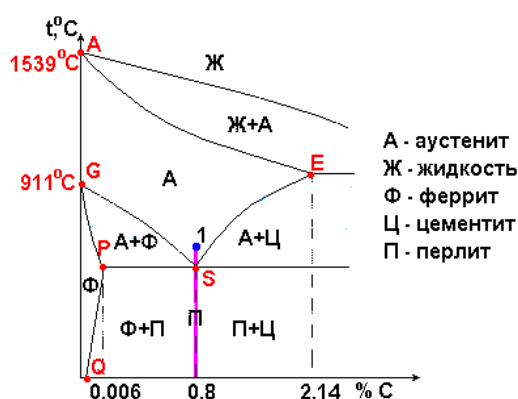


Рис. 11.1. Стальная часть диаграммы железо-углерод

В результате гранецентрированная кубическая решетка аустенита пере-
страивается в объемноцентрированную. Но поскольку в этой решетке остается
весь имеющийся в стали углерод (в данном случае 0,8%), то решетка искажает-
ся, вытягивается и превращается в тетрагональную (рис. 11.2).

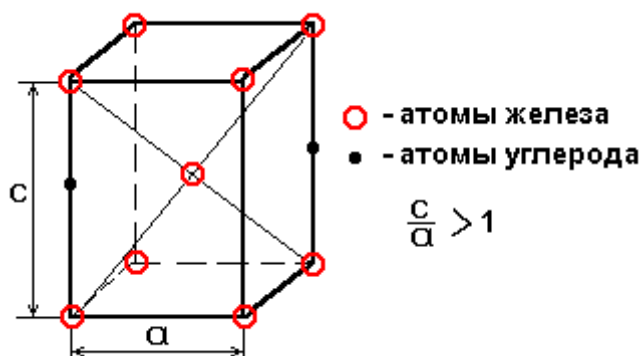


Рис. 11.2. Тетрагональная кристаллическая решетка мартенсита

В такой решетке очень большие искажения, которые определяются отно-
шением c/a , а эта величина возрастает при увеличении содержания углерода в
данном твердом растворе. Полученная таким образом структура, представляю-
щая собой пересыщенный твердый раствор углерода в тетрагональной решетке
железа, называется мартенситом.

Мартенсит - это твердая структурная составляющая. Поэтому сталь с мар-
тенситной структурой будет иметь высокие твердость, сопротивление деforma-
ции, прочность.

Процесс же получения мартенсита, заключающийся в нагреве стали до
аустенитного состояния с последующим быстрым охлаждением, называется за-
калкой.

Твердость мартенсита будет тем больше, чем больше в нем углерода:

HRC	40	48	55	59	62	65	66
% C	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0

Высокая твердость мартенсита связана с сильным упрочнением за счет
большой плотности дислокаций (здесь она достигает $10^9 - 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и сильных
искажений кристаллической решетки.

Образуется мартенситный кристалл очень быстро ($1/10^7 \text{ с}$), и размер его
определяется размером аустенитного зерна. Схематически образование такой
структуры показано на рис. 11.3.

Следует иметь в виду, что мартенсит - это пересыщенный твердый
раствор внедрения. В равновесных условиях в объемно-центрированной решет-
ке железа может содержаться всего нескольких тысячных долей процента угле-
рода, а в мартенсите после закалки стали может быть несколько десятых про-
цента углерода.

Таким образом, это искусственно полученная структура, и, следовательно, в определенных условиях она может превращаться в более равновесные структуры.

Для того чтобы практически осуществлять закалку стали, т. е. говорить о технологии проведения этого процесса, необходимо определить условия выбора температуры нагрева и скорости охлаждения. Эти два параметра являются определяющими при проведении закалки.



Рис. 11.3. Образование мартенсита

При выборе температуры нагрева нужно руководствоваться следующим правилом: доэвтектоидные стали нагреваются под закалку на $30-50^\circ$ выше критической точки A_{c3} , а заэвтектоидные - на $30-50^\circ$ выше точки A_{c1} . Эта область температур заштрихована на рис. 11.4, где геометрическим местом критических точек A_3 является линия GS, а точек A_1 - линия PSK (727°C).

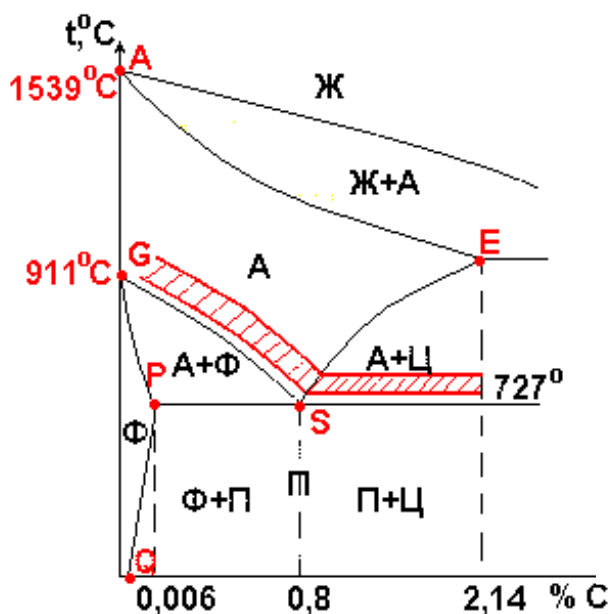


Рис.11.4. Стальная часть диаграммы состояния с областью температур нагрева под закалку

Нагрев до более высоких температур в аустенитной области недопустим, т. к. это вызывает рост аустенитного зерна. Если это произойдет, то из крупнозернистого аустенита образуется крупнопластинчатый мартенсит, и сталь с такой структурой будет очень хрупкая. В практике термической обработки это

считается браком, и называется такой брак перегревом. Перегрев - это исправимый брак, и устранить его можно повторной закалкой с нормальной температуры.

Разный принцип выбора закалочных температур для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей связан со следующими обстоятельствами. В доэвтектоидных сталях ниже линии GS (рис.11.4) в структуре присутствует феррит, и если закалить сталь из этой температурной области, то аустенит превратится в твердый мартенсит, а феррит останется в структуре. Поскольку феррит очень мягкий, то его присутствие в закаленной стали отрицательно скажется на ее твердости. Поэтому необходим нагрев до более высоких температур (выше линии GS), где феррит уже отсутствует.

Для заэвтектоидных сталей такой высокий нагрев не требуется, т. к. выше точки A_1 , но ниже линии SE на диаграмме железо-углерод (рис.9.4) структура состоит из аустенита и цементита. При закалке из этой области аустенит превратится в мартенсит, а цементит остается в структуре. Поэтому наличие в структуре закаленной стали такой твердой структурной составляющей полезно, т. к. закалка и преследует цель - повысить твердость.

Чтобы определить условия охлаждения при закалке стали, необходимо знать закономерности превращения аустенита в другие структуры при различных скоростях охлаждения. Представление об этом дает C-образная диаграмма.

Условия охлаждения стали при закалке

Зная особенности структурообразования при охлаждении аустенита с разными скоростями, можно определить на C-образной диаграмме условия охлаждения стали для получения мартенситной структуры при закалке. Минимальная скорость охлаждения аустенита, при которой он переохлаждается до точки M_n и затем превращается в мартенсит, - это касательная к C-образной кривой (рис. 11.5). Такая скорость охлаждения называется *критической*. Следовательно, при закалке скорость охлаждения должна быть больше критической (V_1 на рис. 11.5).

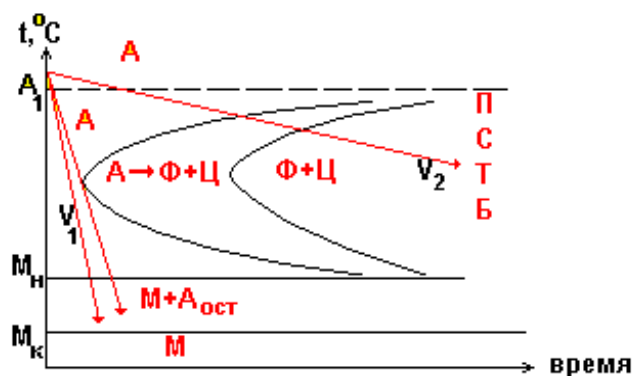


Рис. 11.5. Определение скорости охлаждения при закалке

Для обычных углеродистых сталей значение критической скорости охлаждения составляет около $150^{\circ}\text{C}/\text{сек}$.

Поэтому на практике необходимо охлаждать сталь при закалке очень быстро, чтобы предупредить распад аустенита на феррито-цементитную смесь (что происходит, например, при охлаждении со скоростью V_2 на рис.9.9). Это достигается охлаждением в воде или в водных растворах солей.

Прокаливаемость стали

Поскольку закалка на мартенсит происходит только при скорости охлаждения больше критической, а для реальных деталей скорость охлаждения уменьшается от поверхности к центру, то при достаточно большой толщине детали может оказаться, что скорость охлаждения в сердцевине меньше критической. В этом случае закалится на мартенсит только определенный поверхностный слой, а сердцевина будет незакаленной, с другой структурой и иными свойствами.

Иллюстрация этого приведена на рис. 11.6. На нем показано распределение скоростей охлаждения по сечению деталей разной толщины, штриховой линией обозначена критическая скорость охлаждения при закалке. На нижней проекции заштрихована закаленная на мартенсит зона.

Как следует из рис. 11.6, в случае “а” деталь закаливается по всему сечению, а в крупной детали (позиция “б”) сердцевина остается незакаленной.

При закалке реальных деталей необходимо знать, когда возможна закалка насквозь, по всему сечению, или какой глубины будет закаленный слой.

Критерием такой оценки является *прокаливаемость* стали, под которой понимают глубину закаленного слоя. Для характеристики прокаливаемости стали очень часто используют в качестве параметра критический диаметр. *Критический диаметр* - это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в конкретной охлаждающей среде.

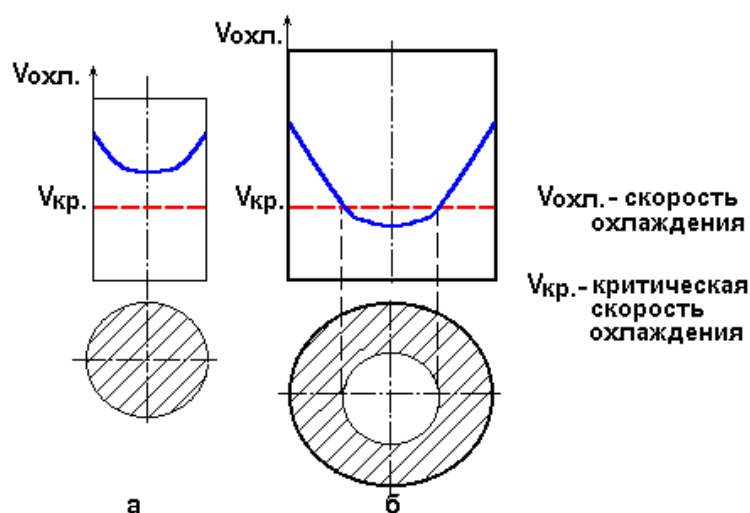


Рис. 11.6. Иллюстрация прокаливаемости стали

Обычно критический диаметр увеличивается и, соответственно, повышается прокаливаемость стали при увеличении охлаждающей способности закалочной среды и при введении в сталь некоторых добавок.

Обычная углеродистая сталь (без специальных добавок) имеет критический диаметр 10-15 мм. Это значит, что при закалке более крупных изделий из такого материала, какая-то зона в сердцевине будет незакаленной.

Прокаливаемость стали необходимо учитывать при выборе материала для изготовления упрочняемых термической обработкой деталей.

Способы закалки стали

В практике термической обработки применяют несколько технологических способов закалки. Среди них:

- 1) закалка в одной среде;
- 2) закалка в двух средах;
- 3) ступенчатая закалка;
- 4) изотермическая закалка.

Охлаждение стали при этих разновидностях закалки показано на рис. 11.7.

Первый способ - закалка в одной среде - наиболее простой, но при этом в детали возникают большие внутренние напряжения. Они складываются из больших термических напряжений, возникающих при быстром охлаждении, и структурных напряжений, образующихся за счет объемных изменений при мартенситном превращении.

Эти напряжения могут привести к образованию трещин, деформации детали. Особенно это опасно в отношении деталей сложной формы, имеющих концентраторы напряжений в виде выточек, отверстий, углов, галтелей и т. п.

Для того чтобы уменьшить недостатки закалки в одной среде, были

предложены другие способы проведения этого процесса.

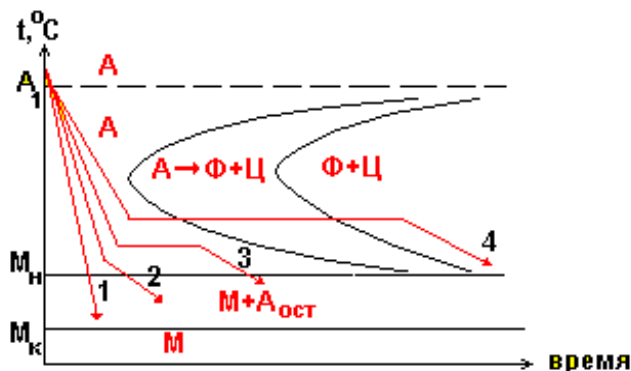


Рис. 11.7. Способы закалки стали

При втором способе закалки (рис. 11.7) сталь быстро охлаждается в интервале температур 750-400°C, затем деталь переносится в другую охлаждающую среду, и в мартенситном интервале охлаждение происходит замедленно. Это приводит к уменьшению величины возникающих при закалке внутренних напряжений и опасности появления трещин. Примером такой закалки может быть процесс с охлаждением вначале в воде, а затем в масле.

Ступенчатая закалка (3 на рис. 11.7) производится погружением нагретой до аустенитного состояния детали в жидкую среду с температурой на 20-30° выше точки M_n . При этом обеспечивается быстрое охлаждение в верхней области температур и делается некоторая выдержка, во время которой выравнивается температура по сечению детали и уменьшаются термические напряжения. Затем детали вынимаются и дальнейшее охлаждение происходит в другой среде более медленно, чаще всего на воздухе или в масле. В этом случае мартенситное превращение происходит при медленном охлаждении в условиях меньших внутренних напряжений. В качестве жидких сред для охлаждения в верхней области температур и ступенчатой выдержки используют расплавы щелочей, селитры, легкоплавких металлов.

Изотермическая закалка (4 на рис. 11.4) существенно отличается от других способов. Здесь делается выдержка в жидкой охлаждающей среде при температуре превращения аустенита в бейнит или тростит до полного распада аустенита. Во всех предыдущих случаях при закалке происходит образование мартенситной структуры.

При изотермической закалке в детали минимальные напряжения, исключается образование трещин и значительно меньше деформация. Кроме того, очень часто этот способ закалки позволяет получать наиболее хорошее сочетание прочностных и пластических свойств.

Поверхностная закалка

Для некоторых типов деталей в соответствии с особенностями нагруже-

ния при эксплуатации необходимо обеспечить высокую твердость, износостойкость поверхности и достаточно хорошую вязкость, пластические свойства в сердцевине. Это касается деталей, работающих в условиях износа с одновременным действием динамических нагрузок (например, шестерни).

В таких случаях детали подвергают поверхностному упрочнению, которое может быть осуществлено с помощью поверхностной закалки.

При поверхностной закалке до закалочных температур нагревается только поверхностный слой детали и только в нем при последующем быстром охлаждении образуется твердая мартенситная структура.

Осуществляется такая технология быстрым нагревом поверхности, при котором сердцевина не успевает прогреваться. Распределение температур по сечению детали, изготовленной из доэвтектоидной стали, при таком нагреве показано на рис. 11.8.

После охлаждения по сечению детали получаются три характерных зоны с разной структурой и свойствами.

В первой зоне (рис. 11.8) после закалки получается мартенситная структура (с некоторым количеством остаточного аустенита) и максимальная твердость.

Во второй зоне после закалки в структуре, кроме мартенсита, будет присутствовать и феррит. Следовательно, твердость там будет ниже.

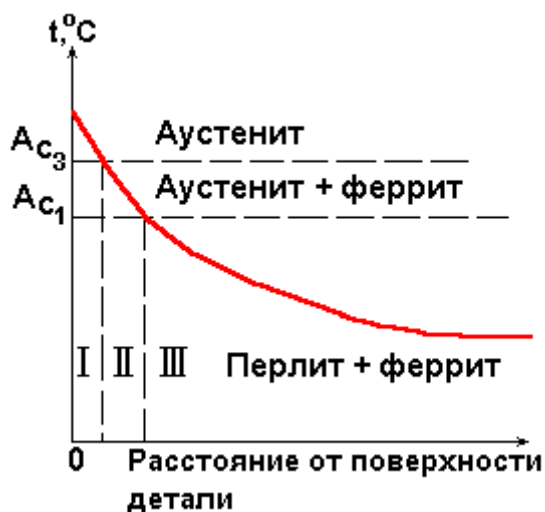


Рис. 11.8. Распределение температур и структура при поверхностном нагреве

В третьей зоне, как видно из рис. 11.8, нагрев и охлаждение не приводят к каким-либо изменениям структуры. Значит, здесь будут присутствовать феррит и перлит, а твердость будет низкая, но достаточно высокими будут пластические свойства.

После поверхностной закалки деталь сможет сопротивляться динамическим нагрузкам за счет вязкой сердцевины и хорошо работать в условиях износа при твердой поверхности.

Быстрый поверхностный нагрев, необходимый при такой технологии,

осуществляется чаще всего индукционным способом токами высокой частоты. Деталь при этом помещается в специальный индуктор, подключенный к источнику тока высокой частоты (генератору). В ней наводятся вихревые токи (причем только в тонком поверхностном слое), которые и осуществляют нагрев.

Иногда для поверхностной закалки может использоваться и электроконтактный нагрев.

Глубина закаленного слоя при этом способе упрочнения может быть в зависимости от необходимости от десятых долей миллиметра до 3-5 мм.

11.2. Отпуск стали

Закаленная сталь, имея высокую твердость, обладает существенными недостатками - низкой пластичностью, большими внутренними напряжениями, хрупкостью. В таком состоянии изделие не работоспособно. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения уровня пластических свойств после закалки всегда следует дополнительная операция термической обработки, которая называется отпуск.

Заключается она в нагреве закаленных деталей до температур в диапазоне 150-650°C, выдержке некоторое время и затем охлаждении, чаще всего на воздухе.

В процессе отпуска происходят структурные изменения и, соответственно, изменения свойств стали. При низкотемпературном отпуске (150-300°C) из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Но поскольку скорость диффузии здесь еще мала, в мартенсите остается некоторая часть углерода.

Такая структура представляет собой малоуглеродистый мартенсит и очень мелкие карбидные частицы. Обычно ее называют отпущенный мартенсит.

При более высоких температурах отпуска - 300-450°C из мартенсита уже выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. При этом тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. В результате вместо мартенсита остается феррит. Такая феррито-цементитная смесь называется троститом отпуска, а процесс, приводящий к подобным изменениям, - среднетемпературным отпуском.

В интервале 450-650°C скорость диффузионных процессов уже настолько возрастает, что при распаде мартенсита образуется более крупная феррито-цементитная смесь, называемая сорбитом отпуска, а процесс называется высокотемпературным отпуском.

Поскольку в закаленной стали имеется некоторое количество остаточного аустенита, то при отпуске он превращается в отпущенный мартенсит при температурах 200-300°C.

Кроме рассмотренных изменений структуры, при отпуске уменьшаются внутренние напряжения. Особенно сильно это происходит при среднетемпературном и высокотемпературном отпуске. При последних разновидностях процесса происходит также уменьшение плотности дислокаций.

С повышением температуры отпуска и его продолжительности происходит увеличение пластических свойств стали и снижение ее твердости, прочности. В качестве примера влияния температуры отпуска на механические свойства в следующей таблице приведены данные для стали с 0,4% С:

Температура отпуска, °С	σ_b , МПа	НВ	δ , %	ψ , %
Без отпуска	1400	600	3	3
200	1400	510	4	18
400	1080	330	11	40
600	700	190	22	58

В практике термической обработки стали, режим отпуска назначают в соответствии с требуемыми свойствами, которые определяются условиями работы детали.

11.3. Отжиг стали

Если закалка - упрочняющая термическая обработка, то отжиг - разупрочняющая обработка. Он проводится для максимального уменьшения твердости, улучшения обрабатываемости резанием и давлением, снятия внутренних напряжений, исправления структуры перегретой стали, повышения пластических свойств.

Иногда отжиг преследует цель - выравнивание состава, повышение однородности распределения элементов в литом сплаве.

При отжиге сталь нагревается несколько выше критической точки A_{c3} (иногда выше A_{c1}), и после некоторой выдержки следует очень медленное охлаждение.

Существует несколько разновидностей этой термической обработки. Среди них:

- 1) полный отжиг;
- 2) неполный отжиг;
- 3) нормализация;
- 4) диффузионный отжиг.

Полный отжиг производится для доэвтектоидных сталей. Для этого производится нагрев выше критической точки A_{c3} на 20-40°С и после небольшой выдержки медленное охлаждение. Практически детали охлаждаются вместе с печью со скоростью 30-100°С/час.

Температурный интервал нагрева для полного отжига показан на стальной части диаграммы железо-углерод (выше линии GS на рис. 11.9).

При нагревании феррит и перлит доэвтектоидной стали превращаются в аустенит, а при медленном охлаждении распад аустенита происходит в верхней части С-образной диаграммы с образованием новых зерен феррита и перлита. Таким образом, если структура была дефектная (крупные зерна, искаженные зерна и т. п.), то при полном отжиге она исправляется. Так как в стали присутствуют мягкие структурные составляющие - феррит и перлит, она имеет хорошие пластические свойства и низкую твердость. Это обеспечивает хорошую обрабатываемость стали резанием и давлением.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что в этом случае нагрев производится выше критической точки A_{c1} (линия PSK на диаграмме железо-углерод) на 20-40°C, рис. 11.9. Эта операция производится как для доэвтектоидных, так и для заэвтектоидных сталей.

Охлаждение производится так же, как и при полном отжиге, вместе с печью.

При неполном отжиге не происходит изменение ферритной составляющей структуры, т. к. феррит сохраняется при нагреве (рис. 11.9). Поэтому полного исправления структуры не происходит.

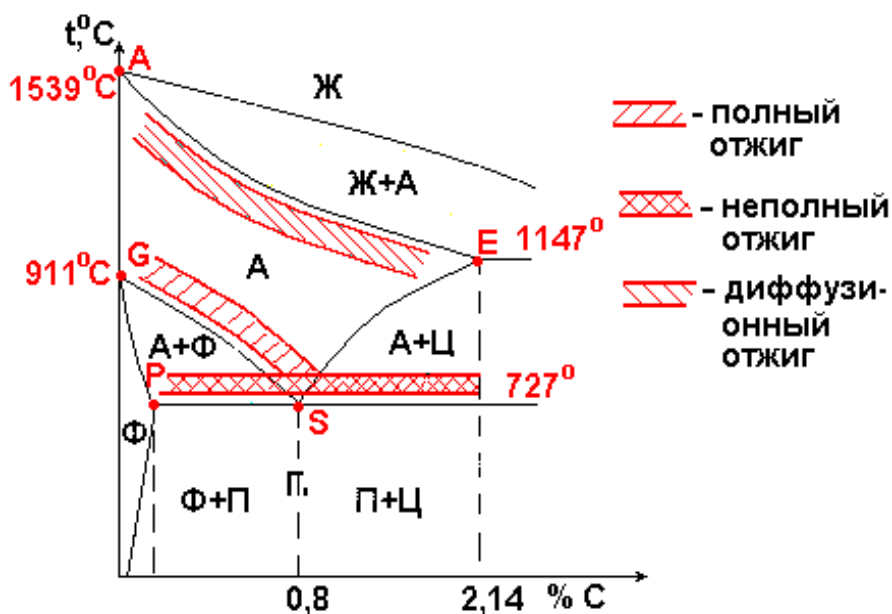


Рис. 11.9. Стальная часть диаграммы с областями температур нагрева для отжига

Обычно эта операция производится для уменьшения твердости и улучшения обрабатываемости стали, снятия внутренних напряжений.

Нормализацией называется операция термической обработки, при которой сталь нагревают до аустенитного состояния, выдерживают и охлаждают на воздухе. По сравнению с отжигом она более производительна и экономична.

Нормализация связана с полной перекристаллизацией и у горячекатаной стали измельчает структуру, повышает работу развития трещин, понижает порог хладноломкости.

Нормализация как промежуточная обработка аналогична отжигу, ее применяют для низкоуглеродистых сталей вместо полного отжига. Но она не может заменить смягчающий отжиг для среднеуглеродистых сталей, которые при охлаждении на воздухе имеют большую твердость и прочность. Ее часто используют для общего измельчения структуры перед закалкой.

Исправить структуру заэвтектоидной стали можно только нормализацией. Она измельчает зерно, и при ускоренном охлаждении на воздухе цементит вторичный не успевает образовать грубую сетку по границам зерен.

Для исправления структуры некоторых легированных сталей сочетание нормализации и высокого отпуска при температуре 500 – 650°С будет экономичнее полного отжига. Иногда нормализацию используют как окончательную обработку для получения структуры сорбита. Следует отметить, что скорость охлаждения на воздухе зависит от массы изделия и отношения его поверхности к объему. Эти факторы сказываются на структуре и свойствах нормализованной стали.

11.4. Химико - термическая обработка

Часто для упрочнения тонкого поверхностного слоя деталей, увеличения его твердости и износостойкости производят диффузионное насыщение этого слоя различными элементами. При этом меняется химический состав в поверхностном слое. Осуществляется такая обработка при повышенных или высоких температурах, что необходимо для обеспечения достаточной скорости диффузионных процессов, помещением деталей в атмосферу или среду определенного состава. Необходимые элементы диффундируют из этой среды в поверхностный слой деталей.

Такой процесс изменения химического состава и свойств поверхности изделия под действием температуры и окружающей среды заданного состава называется химико-термической обработкой.

В зависимости от того, каким элементом производится насыщение, различают несколько разновидностей химико-термической обработки.

Если поверхностный слой деталей насыщается углеродом, то такая обработка называется *цементацией*, если азотом, то *азотированием*, бором - *борированием*, алюминием - *алитированием* и т. д.

Иногда насыщение может осуществляться одновременно двумя элементами. Например, углеродом и азотом.

Такая химико-термическая обработка называется *нитроцементацией*.

После химико-термической обработки для формирования необходимых свойств часто проводится упрочняющая термическая обработка (закалка и отпуск). В отдельных же случаях такой дополнительной обработки не требуется. Все зависит от того, какая структура формируется в поверхностном слое стали в процессе химико-термической обработки, и какие она обеспечивает свойства.

Цементация

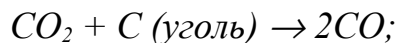
При цементации поверхностный слой детали упрочняется за счет насыщения его углеродом и последующей закалки. В результате в этих участках изделия формируется высокоуглеродистый мартенсит с избыточными карбидами, что и обеспечивает высокие твердость и износостойкость.

Осуществляется процесс цементации при температуре 900 - 950°C. Детали помещаются в среду определенного состава, называемую карбюризатором. Этот карбюризатор может быть твердый или газообразный. В качестве твердого карбюризатора часто используют смесь древесного угля с добавлением к нему 20-25% $BaCO_3$ и 3,5-5,0 % $CaCO_3$. Могут применяться и другие составы. Детали помещаются в специальные ящики с карбюризатором, и там при высокой температуре образуется среда, из которой атомарный углерод диффундирует в поверхностный слой металла.

Принципиально механизм процесса заключается в следующем:



CO_2 взаимодействует с углем по реакции:



при температуре цементации CO разлагается по реакции:



в результате образуется необходимый для диффузии атомарный углерод.

При длительности процесса цементации от 5 до 24 часов глубина цементованного слоя получается от 0,4 до 2,5 мм, т. е. чем длительнее процесс, тем на большую глубину происходит насыщение углеродом поверхности изделия. В настоящее время цементация в твердом карбюризаторе применяется довольно редко, т. к. это малопроизводительный процесс. Чаще используют цементацию в газообразном карбюризаторе, которым служат углеродосодержащие газы: метан, пары керосина, синтин и т. п. При температуре цементации эти газы разлагаются с образованием атомарного углерода, который затем и диффундирует в сталь.

Например:





Для газовой цементации используются специальные печи, в которых поддерживается необходимая атмосфера. Этот процесс более производительный, чем в твердом карбюризаторе. Здесь цементованный слой глубиной 0,8-1,2 мм получается за 3-5 часов.

Максимальная концентрация углерода на поверхности детали после цементации составляет чаще всего 1,1-1,3%. По мере перемещения от поверхности к центру содержание углерода уменьшается до 0,1-0,2% (для цементации используются обычно низкоуглеродистые стали).

В поверхностном слое после охлаждения цементованных изделий структура стали будет представлять собой, согласно диаграмме железо-углерод, перлит и цементит.

Затем эти детали подвергаются закалке и отпуску, в результате чего в поверхностном слое достигается высокая твердость (HRC 63-65). Сердцевина же при этом останется мягкой, с достаточным запасом вязкости и пластичности. Такое сочетание свойств и позволит детали сопротивляться действию одновременно изнашивающих и динамических нагрузок при эксплуатации.

Отпуск чаще всего делается низкотемпературный, при 150-200°C.

Азотирование

При азотировании поверхностный слой деталей насыщается азотом с целью увеличения износостойкости поверхности. При этом процессе получается более высокая твердость и, следовательно, износостойкость, чем при цементации (до 70-72 HRC). Одновременно возрастает коррозионная стойкость стали в атмосфере и усталостная прочность (при знакопеременных нагрузках).

Но азотирование - более длительный процесс, чем цементация, и глубина упрочненного слоя здесь получается меньше. Высокая твердость азотированного слоя сохраняется при нагреве до 500-600°C. Это существенно выше, чем у цементованного слоя.

Осуществляется процесс азотирования в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре 500-600°C.

Аммиак при этой температуре диссоциирует с образованием атомарного азота, который и диффундирует в металл:



Попадая в сталь, азот частично растворяется в твердом растворе и образует с железом соединения Fe_4N , Fe_2N , которые называют нитридами. Если в стали содержатся легирующие элементы, то азот может взаимодействовать и с ними, образуя частицы соответствующих соединений (например, CrN , MoN).

Возникающие в поверхностном слое деталей частицы нитридов очень

мелкие (толщина их до 20-40 Å), и поэтому они являются эффективными препятствиями для движения дислокаций, упрочняющими металл. Кроме того, эти нитриды имеют высокую твердость. Поскольку температуры азотирования невысокие и скорость диффузии при этом мала, процесс идет достаточно медленно. Так, азотированный слой глубиной от 0,1 мм до 0,8 мм при температуре 500-520°C получается соответственно за время от 3 до 90 часов.

Эта операция чаще всего является заключительной в технологическом процессе изготовления изделий. Она производится после полной механической обработки и закалки с отпуском.

Для азотирования обычно используются конструкционные, среднеуглеродистые стали, легированные хромом, алюминием и другими элементами. Среди них: 38ХМЮА, 35ХЮА, 30Х2Н2ВФА и др.

Иногда с целью дополнительного увеличения износостойкости азотированию подвергается инструмент, изготовленный из высоколегированной быстрорежущей стали.

Нитроцементация

Нитроцементация - это одновременное диффузионное насыщение поверхностного слоя деталей азотом и углеродом.

По своим свойствам нитроцементованный слой стали занимает промежуточное положение между цементованным и азотированным слоями.

Производится процесс нитроцементации в газовой или иногда в жидкой среде.

Газовая нитроцементация осуществляется в смеси науглероживающего газа (светильный газ, метан, синтин и др.) и аммиака. Различают 2 разновидности этого процесса - высокотемпературный и низкотемпературный. В первом случае нитроцементация идет при температуре 820-850°C, а во втором - при 530-570°C.

Температура процесса очень сильно влияет на глубину нитроцементованного слоя и содержание в нем углерода и азота. Эти зависимости показаны на рис. 10.2 и 10.3.

При высокотемпературном процессе можно получить довольно большие слои (до 1,5-2,0 мм), и производительность здесь достаточно большая. Это основные его преимущества.

При высокотемпературном процессе в насыщенном слое будет больше углерода и довольно мало азота, а при низкотемпературной нитроцементации - наоборот, в слое много азота и меньше углерода. Свойства таких слоев тоже будут отличаться, т. к. они зависят от состава и строения структурных составляющих стали. При низкотемпературной нитроцементации будет более высокая твердость и износостойкость поверхности деталей, но меньше глубина упрочненного слоя.

Продолжительность процесса этой химико-термической обработки тоже

влияет на концентрацию элементов в поверхностном слое и их соотношение.

В практике проведения газовой нитроцементации длительность процесса обычно составляет от 2 до 12 часов. После высокотемпературного процесса необходимо делать упрочняющую термическую обработку - закалку и низкотемпературный отпуск. При этом в поверхностном слое деталей формируется необходимая структура и свойства. Твердость в этом случае составляет 63-64 HRC.

После низкотемпературной нитроцементации дополнительной упрочняющей обработки не требуется, т. к. предварительно детали подвергаются закалке и отпуску, а также окончательной механической обработке, включая шлифование. В атмосфере печи при низкотемпературном процессе содержится больше аммиака (20-30 %) по сравнению с высокотемпературной нитроцементацией. В структуре насыщенного слоя находятся мартенсит и карбонитридные и нитридные мелкие частицы. Твердость в этом случае выше и достигает 67-68 HRC.

Иногда низкотемпературный процесс нитроцементации, особенно в жидкой среде, называют *цианированием*. Его используют для изделий из теплоустойчивых сталей. Например, такой обработке подвергают инструмент из быстрорежущих сталей. Это обеспечивает повышение его износостойкости.

Нитроцементации подвергаются детали и инструмент, изготовленные из легированных сталей, таких, как 20X, 18XГТ, 18X2H4BA, P6M5 и др.

Режим этой химико-термической обработки и глубина упрочненного слоя выбираются в зависимости от условий работы изделий, характера действующих нагрузок и требуемого срока эксплуатации.

ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В производстве возникают технологические проблемы обработки материалов, когда традиционные методы либо неэффективны, либо неприемлемы.

К таким проблемам относятся обработка весьма прочных или вязких материалов, например, разрезка листов толщиной 20мм из жаропрочной стали, обработка хрупких материалов (стекла, алмаза), фасонная обработка сложных поверхностей, прорезка тонких пазов и обработка отверстий размером в несколько микрон, получение поверхностей деталей с малой шероховатостью и очень малой толщиной дефектного слоя и т.п.

Подобные проблемы решаются электрофизическими и электрохимическими методами обработки (ЭФХМО), такими, как электрохимическая, электроэрозионная, ультразвуковая, плазменная, светолучевая, гидроструйная.

Эффективность применения ЭФХМО тем выше, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности и выше физико-механические свойства заготовки, особенно твердость, вязкость.

12.1. Электроэрозионные методы обработки

Электроэрозионные методы основаны на явлении эрозии (разрушения) электродов из *токопроводящих* материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока. Электрический разряд происходит в заполненном газом или диэлектрической жидкостью (керосином, минеральным маслом и т.п.) межэлектродном промежутке размером 0,01...0,05мм.

При наличии потенциала на электродах межэлектродное пространство ионизируется. Когда разность потенциалов достигает определенной величины, в среде между электродами образуется канал проводимости, по которому устремляется электрическая энергия в виде импульсного искрового или дугового разряда. Благодаря высокой концентрации энергии, реализуемой во $10^{-5} \dots 10^{-8}$ с, мгновенная плотность тока в канале проводимости достигает 8000...10000А/мм², в результате чего температура на поверхности обрабатываемой заготовки-электрода возрастает до 10000... 12000°С.

При этой температуре мгновенно оплавляется и испаряется элементарный объем металла, и на обрабатываемой поверхности образуется лунка. Удаленный металл застывает в диэлектрической жидкости в виде сферических гранул диаметром 0,01...0,005мм.

Следующий импульс тока пробивает межэлектродный промежуток там, где расстояние между электродами окажется наименьшим.

Для обеспечения непрерывности процесса обработки необходимо, чтобы зазор между инструментом - электродом и заготовкой был постоянным: это обеспечивается механизмом автоматической подачи инструмента. Электроэрозионными методами возможно обработать фасонные отверстия, в том числе с

криволинейными осями (например, винтообразную канавку в закаленном шаре), фасонные полости и поверхности, можно вырезать заготовку из листа при использовании проволочного или ленточного электрода-инструмента, осуществлять клеймение и т.д.

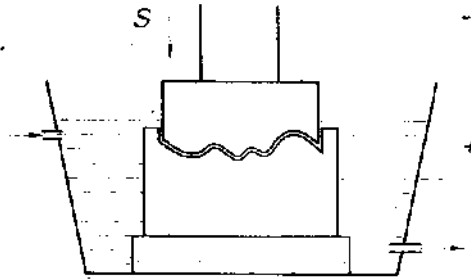


Рис. 12.1. Схема электроэрозионной обработки

На рис. 12.1 показана схема обработки фасонной полости штампа. В зависимости от энергии источников питания возможно реализовать жесткий (высокопроизводительный) средний либо мягкий (отделочный) режимы. Последний позволяет достигнуть точности размеров до 0,002мм и 8... 10-го класса шероховатости поверхности

12.1. Электрохимические методы обработки

Электрохимические методы обработки (ЭХО) основаны на явлении *анодного растворения* при электролизе. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом.

Разновидности ЭХО: электрохимическое полирование, электрохимическая размерная обработка, электроабразивная обработка и др.

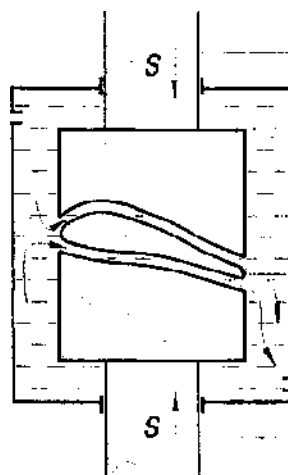


Рис. 12.2. Схема электрохимической размерной обработки

Электрохимическое *полирование* осуществляют в ванне, заполненной электролитом - раствором кислот или щелочей. Заготовку подключают к аноду.

При подаче напряжения начинается процесс растворения материала-заготовки, причем, растворение происходит главным образом *на выступах микронеровностей* вследствие более высокой плотности тока на их вершинах.

Электрохимическая *размерная обработка* (рис. 12.2) осуществляется в струе электролита, прокачиваемого через межэлектродный промежуток, составляющий 0,06...0,25мм. Электролит удаляет продукты анодного растворения (соли) из зоны обработки.

12.3. Плазменная обработка

Такая среда, в которой значительная часть молекул или атомов ионизирована, называется плазмой.

Плазма находит технологическое применение, прежде всего в процессах, которые требуют высокотемпературного концентрированного нагрева значительных зон заготовки. В промышленности широко используется плазменная резка металлов, плазменные наплавка, сварка, напыление тугоплавких металлов, оксидов, карбидов и нитридов, а также комбинированное воздействие, называемое плазменно-механической обработкой.

Для получения плазмы, используемой в технологических целях, разработан ряд устройств, называемых плазмотронами или плазменными горелками. Наиболее распространены плазмотроны, в которых нагрев газа до температуры образования плазмы осуществляется электрическим дуговым разрядом. Применяются также высокочастотные плазмотроны с так называемым «безэлектродным разрядом».

Принципиально тот же результат можно достигнуть и при сжигании горючих смесей в обычных горелках, но эффективность таких устройств значительно ниже.

Плазмообразующие газы во всех вариантах плазмотронов могут быть различными.

Основные физические характеристики плазмы, используемой для технологических целей, сводятся к следующим:

Степень ионизации плазмы – это количественная характеристика, определяемая отношением числа заряженных частиц в плазме и числа нейтральных частиц, атомов или молекул, существовавших в том же объеме исходного газа. В технологических целях применяют, низкотемпературную плазму, представляющую собой частично ионизированный газ с температурой $10^3 \dots 10^5$ °К.

Квазинейтральность плазмы означает, что в определенном объеме число отрицательно заряженных частиц (электронов) равно числу положительно заряженных частиц (ионов).

По мере снижения давления число частиц в объеме уменьшается и может наступить момент, когда количество частиц будет настолько мало, что условия квазинейтральности не будут выполняться.

Минимальный объем, где еще может соблюдаться квазинейтральность

плазмы, определяется **дебиевским радиусом** (по имени ученого П. Дебая).

При рассмотрении плазмы как совокупности заряженных частиц различных знаков вводят понятие *электронной* и *ионной* температур. В отличие от обычной газовой смеси, все частицы которые имеют одинаковую среднюю кинетическую энергию беспорядочного теплового движения, у электронов, ионов и нейтральных атомов этой энергии различна, поскольку электрон является значительно более легкой частицей, а температура определена, как мера энергии частицы. Электронная температура всегда выше температуры ионов и нейтральных атомов из-за большей подвижности электрона. При понижении плотности плазмы разница электронной и ионной температур может достигать нескольких порядков. Однако, для плазмы, используемой в технологических установках, где давление достаточно велико, можно практически считать, что эти температуры равны. Такая плазма называется термической, и к ней в ряде случаев можно применять принципы термодинамики.

Энтальпия плазмы, иначе называемая теплосодержанием, зависит как от температуры, так и от вида плазмообразующего газа. Для технологических процессов, когда не нужны высокие температуры (превышающие 10^4 °К), в качестве плазмообразующих газов целесообразно использовать азот, водород, кислород, воздух. Для получения более высоких температур следует применять плазму одноатомных газов (аргона, гелия).

Наиболее высокими удельными значениями энтальпии обладает водород, однако, применение его в плазматронах в чистом виде ведет к разрушению электродов. Поэтому используют водородно-азотную или водородно-аргоновую смеси газов, где объемное содержание водорода составляет 10...20%.

Плазменный нагрев позволяет получать в первой фазе нитриды, карбиды и оксиды тугоплавких металлов и не металлов высокой частоты.

Основными характеристиками плазменного источника энергии является его тепловая мощность, определяемая отношением количества теплоты, вводимой в основной металл, ко времени ее введения, а также коэффициент сосредоточенности, определяющий распределение теплового потока по поверхности обрабатываемого изделия.

При использовании плазменной струи часть энергии расходуется на нагрев анода – сопла. Поэтому с энергетической точки зрения более рационально использовать плазменную дугу, чем плазменную струю.

Плотность теплового потока у плазменных источников выше, чем у открытой дуги. Нагрев газа в плазматроне приводит к резкому уменьшению плотности газа, за счет чего увеличивается скорость его истечения.

Большая скорость потока плазмы при выходе ее из плазматрона позволяет получать значительный газодинамический напор, который растет с увеличением силы тока и может быть использован в различных технологических целях.

В большинстве случаев расход газа в плазматроне носит турбулентный характер. Уменьшение расхода газа позволяет получить ламинарные струи большой длины и высокой стабильности.

Нагрев деталей и материалов до невысоких температур (ниже точки их плавления) с помощью плазменных горелок используется сравнительно редко. Однако применяется плазменно-механическая обработка металлов. Сущность этого метода состоит в том, что при обработке резанием высокопрочных материалов и сплавов перед резцом устанавливается плазматрон, нагревающий узкую зону обрабатываемого материала. Так как при нагреве прочность обрабатываемого материала снижается, а пластичность увеличивается, можно увеличить подачу и глубину резания. Плазменно-механическая обработка применяется при изготовлении деталей из жаропрочных сталей и сплавов на базе вольфрама, молибдена и других материалов.

Плавка металлов, сплавов, а также не металлических материалов с использованием плазменного нагрева получила широкое распространение, так как данный способ отличается высокой стабильностью, простотой и гибкостью технологического процесса.

Наиболее распространенной является схема плавки в водоохлаждаемый кристаллизатор. Плазменный нагрев используется также для плавки металла с последующей раскристаллизацией расплава в виде малоразмерных капель с использованием его в дальнейшем как исходного продукта в порошковой металлургии, для наплавки и т. д.

Сварка с использованием плазменных источников применяется в все большем масштабе, поскольку по сравнению с свободно горящей электрической дугой удастся получить большую глубину проплавления, меньшую ширину шва наиболее узкую зону термического влияния. Процесс идет с большей скоростью при улучшении сварного шва.

Плазменная наплавка используется для нанесения поверхностных слоев (чаще всего из металлов и сплавов, отличных по составу от материала подложки) с целью повышения эксплуатационных свойств деталей. Для наплавки применяют материалы с повышенной износостойкостью, высокой твердостью, коррозионной и термической стойкостью и др. Возможна многослойная наплавка.

Наплавку производят плазменной струей, что дает возможность регулировать глубину проплавления основного металла по средствам изменения расстояния между плазмотроном и заготовкой. В качестве плазмообразующих газов используют аргон и водород.

Плазменной наплавкой упрочняют отдельные детали станков, изготавливают режущие инструменты из обычных углеродистых сталей с наплавкой рабочих лезвий из инструментальных сталей.

Плазменную наплавку применяют для нанесения на остальные подложки меди, бронзы, сплавов типа “стеллит” и хромоникелевых сплавов (клапаны, двигатели внутреннего сгорания). Плазменная наплавка применяется также для восстановления штампов, пресс-форм и т. д.

Плазменное напыление отличается тем, что наносимый материал нагревается внутри самого плазмотрона, а затем осаждается на подложку.

Плазменным напылением получают слои малой толщины. Можно также

получать корковые изделия, состоящие только из напыленного материала. Для увеличения сцепления с подложкой обычно применяют предварительный подогрев заготовки и создание промежуточных химически активных слоев.

Металлические покрытия, получаемые с помощью плазменного напыления, чаще всего состоят из вольфрама, молибдена, ниобия, кобальта, никеля и других металлов и сплавов с достаточно высокой температурой плавления.

Напыленные оксидные покрытия отличаются высокой жаростойкостью и сравнительно низкими показателями тепло-и электропроводности. Их используют в качестве защитных покрытий на основе оксидов алюминия и циркония. Таким напылением повышают стойкость кокилей и изложниц для литья и др.

Одной из разновидностей плазменного напыления является ионная технология напыления покрытий с помощью плазменных ускорителей. Материал покрытия получается путем испарения в вакууме водоохлаждаемого катода. Затем его ионизируют в электрическом разряде, и полученная плазма фокусируется и ускоряется по направлению к обрабатываемой поверхности. Энергия, которая сообщается ионам в плазме, позволяет внедрять их в обрабатываемые поверхности и получать прочные поверхностные покрытия.

Ионная технология плазменного напыления позволяет также получать покрытия сложного химического состава, например: из оксидов, карбидов и нитридов металлов.

Плазменным напылением получают тонкостенные детали сложной геометрической формы из труднообрабатываемых материалов, например, вольфрама, молибдена и др. Материал напыляют на оправки или на шаблоны, которые могут или растворяться химическим путем или разбираться на части.

Плазменной резкой можно разрезать практически любые материалы, тогда как, например, кислородная резка пригодна для углеродистых сталей. Недостатком плазменной резки является то, что толщина разрезаемых заготовок не превышает 250...300 мм.

В качестве пламяобразующих газов при резке используются аргон, азот, водород и их смеси, а также воздух.

12.4. Ионно-вакуумная обработка

При ионной бомбардировке в качестве первичных частиц могут быть использованы как положительные, так и отрицательные ионы, а также нейтральные атомы, а также молекулы и многозарядные ионы. Наиболее часто используют ионы, несущие положительный заряд. Поскольку в качестве бомбардирующих частиц можно использовать ионы практически всех элементов, а также молекулярные ионы и частицы в разных зарядовых состояниях, то ионные пучки являются более гибким средством воздействия на объект по сравнению с электронными.

Чтобы не происходило рассеяния и нейтрализации ионов на их пути к мишени, а также захвата ими чужеродных атомов, при энергиях пучка порядка

1...10кВт и длине пути ионов порядка 1 метра, вакуум установки должен быть лучше 10^{-2} Па.

При сближении иона с поверхностью на расстояние порядка атомных становится возможным переход из электрона твердого тела на нижележащие уровни иона. Высвободившаяся энергия может быть безизлучательным образом передано другому электрону твердого тела в результате **оже-процесса**. Если этот второй электрон окажется на уровне выше вакуумного, и направление его импульса будет благоприятным, то будет наблюдаться эмиссия электронов, называемая **потенциально-электронной эмиссией**. Это позволяет судить о распределении энергетических состояний валентных электронов твердого тела в приповерхностных слоях и называется **ионно-нейтрализационной спектроскопией**.

Проникнув в твердое тело, ионы теряют энергию, испытывая два различных типа соударений – упругие и неупругие.

Упругими (ядерными) соударениями называются такие соударения, при которых энергия иона передается атомам твердого тела. Упругие соударения ионов с атомами сопровождаются сильным рассеянием первичных ионов.

Неупругими (электронными) являются соударения, которых энергия иона передается электронам. Неупругие потери не сопровождаются заметным рассеянием первичных ионов, так как слишком велика разница масс взаимодействующих частиц.

При облучении ионами в результате **неупругих** соударений происходят следующие явления.

Возбуждение электронов – это появление электронов на высоких ранее свободных энергетических уровнях и одновременное образование вакансий на низших уровнях, которые в условиях термодинамического равновесия являются заполненными. Для полупроводников и диэлектриков, как и при электронном облучении, под воздействием пучка ионов может наблюдаться увеличение проводимости, т. е. явление **радиационной проводимости**.

В результате возбуждения ионами и последующих переходов между энергетическими уровнями часть электронов, находящихся слое толщиной, равной глубине выхода (приблизительно 1нм), может преодолеть потенциальный барьер на границе “твердое тело - вакуум”, в результате чего будет наблюдаться эмиссия таких электронов. Это явление называется **кинетической электронно-ионной эмиссией**. Появление пиков в распределениях этих электронов по энергиям, связано с получением энергии в результате **оже-процессов** при заполнении низких свободных уровней вышележащими электронами. На анализе величины и энергетического положения этих пиков основана **ионная оже-спектроскопия**.

При релаксации возбуждения электронной подсистемы твердого тела, вызванного неупругими соударениями атомных частиц, энергия может выделяться и в виде квантов излучения. В этом случае наблюдается свечение, называемое **ионолюминесценцией**. Длина волны этого излучения может лежать в

инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях. При образовании глубоких электронных вакансий, как это имеет место, например, при облучении быстрыми протонами, наблюдается и **характеристическое рентгеновское излучение**. При проникновении ионов в твердое тело, как и в случае электронной бомбардировки, возникают **переходное** и **тормозное** излучения. Эти виды излучения имеют интенсивность, заметную при энергиях, значительно больших, чем при электронной бомбардировке.

При проникновении ионов в твердое тело, как и в случае электронной бомбардировки, возникают **переходное** и **тормозное** излучение. Эти виды излучения имеют интенсивность заметную при энергиях, значительно больших чем при электронной бомбардировке.

Эффект увеличений диффузии примеси при заданной температуре в результате ионного излучения называется **ионно-стимулированной диффузией**. Изменение скорости распада сложных дефектов приводит к **радиационно-стимулированному отжигу** дефектов, а иногда, наоборот, к образованию **радиационных дефектов**. Могут также начаться химические реакции, невозможные при данной температуре в равновесных условиях.

В следствие упругих столкновений ионов с атомами ион может снова выйти в вакуум, т. е. происходит **отражение** ионов от твердого тела. Такой отраженный ион может сохранить свое зарядовое состояние, а может и изменить его, превратившись например в нейтральную частицу. Если проводить измерения распределения по энергиям ионов, отраженных в определенном направлении, то можно определить элементный состав мишени. **Метод обратного рассеяния медленных ионов** позволяет определить вид атомов, находящихся на поверхности, а **метод обратного рассеяния быстрых ионов** – распределение атомов по различной глубине.

Атомы вещества, получая в результате упругих соударений энергию первичного иона, смещаются из положений равновесия, т. е. упругие взаимодействия приводят к образованию радиационных дефектов. Простейшие дефекты, двигаясь по кристаллу, могут объединяться между собой и с примесями в более сложные комплексы, или, наоборот, исчезать на различных стоках или рекомбинировать между собой. Наличие дефектов изменяет свойства твердого тела: электрические, магнитные, оптические, механические и химические. Из-за образования дефектов возможны и **фазовые переходы**, например, переход полупроводниковых образцов под воздействием бомбардировки из кристаллического в аморфное состояние.

При определенных условиях упругие процессы могут также вызывать **радиационно-стимулированный отжиг**.

Атомы или группы атомов в поверхностном слое толщиной порядка 1 нм, могут выйти из мишени, в результате чего произойдет **распыление вещества**. Вылетающие атомы и целые “куски” вещества (кластеры, которые содержат десятки атомов, могут находиться в нейтральном, возбужденном или заряженном состоянии). Это явление используется для контролируемого удаления вещества

с определенных участков образца (**ионное травление**). Распыленное вещество можно садить на подложку и осуществить таким образом **напыление тонких пленок**. Анализируя распределение распыленных частиц по массам, можно судить о составе мишени (вторичная, ионная, масс-спектрометрия). Атомы, группы атомов и ионы, вылетевшие в возбужденном состоянии в вакуум могут, переходить в не возбужденное состояние, испуская кванты света. Это явление в отличие от ионолюминесценции, при которой свечение вызывается переходами электронами внутри тела, называется **ионо-фотонной** эмиссией. Анализ спектров ионо-фотонной эмиссии дает возможность устанавливать состав приповерхностных слоев исследуемого образца.

Особенность ионной бомбардировки по сравнению с другими свойствами изменения свойств материалов состоит в следующем:

Во-первых, то изменение свойств происходит в основном, лишь в тонком приповерхностном слое, что позволяет получать неоднородные по глубине структуры.

Во-вторых, используя масс-спектрометры, можно вводить в объект только ионы данного вида и можно точно задавать дозу внедренных ионов.

Наконец, прочес внедрения ионов – это не равновесный процесс, поэтому ионная бомбардировка позволяет вводить в вещество мишени, плохо диффундирующие примеси, а также примеси в количествах, превышающих предел растворимости.

При облучении металлов основным является эффект уменьшения подвижности носителей зарядов за счет введения новых центров рассеяния – радиационных дефектов и самих внедрившихся частиц, что приводит к увеличению электрического сопротивления. При больших дозах возможно образование новых сплавов или химических соединений, у которых проводимость, как и другие свойства, соответствуют конечному, а не исходному продукту.

Если облучаются тонкие металлические пленки, то их сопротивление может возрасти из-за испарения и уменьшения толщины.

При удачном выборе сорта примеси **ионным внедрением (имплантацией)** в полупроводник можно вводить центры, являющиеся активными донорами или акцепторами, и, таким образом изменять проводимость в широких пределах.

Ионная имплантация используется для создания в полупроводниках р-п переходов. Так как при ионной имплантации внедренные частицы, потеряв кинетическую энергию, останавливаются как в узлах, так и в междоузельных положениях, то их еще надо поместить в электрически активное положение. Это обеспечивается высокотемпературной обработкой полупроводника. Высокотемпературный прогрев позволяет также удалять (отжигать) радиационные дефекты, созданные в процессе имплантации.

Хотя при изготовлении полупроводниковых структур ионной имплантацией высокотемпературная обработка и является неотъемлемой частью технологического процесса, тем не менее, таких высоких температур, как при термо-

диффузии, не требуется.

Имплантацию примеси в полупроводник не обязательно проводить из ионного пучка. Иногда удобно сначала высадить на поверхность полупроводника тонкую пленку из вещества, предназначенного для имплантации, а затем подвергнуть пленку бомбардировке ионами, например, инертными газами.

Имплантация атомов отдачи (т. е. атомов пленки) применяется тогда, когда ионы данного сорта получить трудно, а напылить пленку – легко. Этот метод используется также, если необходимо обогатить приповерхностный слой.

Еще один механизм изменения концентрации носителей заряда при ионной бомбардировке – это **активизация нейтральной примеси**.

На изменение свойств твердотельных материалов при ионной бомбардировке влияют три основных эффекта: ионная имплантация из пучка; структурные превращения, т. е. образование и накопление радиационных дефектов, аморфизация, кристаллизация и т. п.; катодное распыление, т. е. выбивание атомов с поверхности и из приповерхностного слоя в вакуум.

Металлы и полупроводники при ионном облучении ведут себя различно.

Металлы характеризуются высокой скоростью отжига радиационных дефектов, поэтому при комнатной температуре их аморфизации под воздействием ионного облучения не происходит.

При облучении металлических поликристаллических пленок может происходить изменение преимущественной ориентации зерен, причем обычно получаемые структуры ориентированы на наиболее плотноупакованным направлением параллельно ионному пучку. Возможен переход к более плотноупакованным решеткам. Полученные таким образом кристаллы являются метастабильными, т. е. их нагрев до 400-500°C приводит к восстановлению исходной структуры.

У материалов с не металлическим типом электропроводности может иметь место как аморфизация кристаллических, так и кристаллизация аморфных веществ. Это зависит (приблизительно) соотношения температуры плавления и кристаллизации.

Существует также явление называемое **эффектом больших доз**, которая состоит в том, что при бомбардировке ионами приповерхностный слой сперва аморфизуется, а затем снова кристаллизуется. Это происходит в следствие нагревания кристалла ионным пучком, радиационно-стимулированных процессов и снижения порога кристаллизации при накоплении в поверхностных слоях примеси.

Создание соединений в результате ионной бомбардировки называется **ионным синтезом**. Синтез нового соединения в общем случае происходит через образование молекулярных комплексов. Ионным синтезом можно создавать защитные пленочные покрытия, изолирующие слои при изготовлении интегральных схем, антикоррозионные покрытия, световоды, синтезировать сверхпроводящие материалы, а также при изготовлении полупроводниковых структур на основе тройных соединений, например.

Получение сплавов и получение твердых растворов ионным внедрением называется **ионной металлургией**. Здесь можно создавать не только равновесные сплавы, которые можно получать и обычными металлургическими способами, но и новые метастабильные сплавы. При ионном облучении могут возникать газовые пузырьки. Они могут объединяться и лопаться, в результате чего отслаиваются **чешуйки**. Это явление называется **блистерингом**.

С помощью ионных пучков можно наращивать на твердые подложки **монокристаллические пленки** материалов. Это называется **ионной эпитаксией**. Здесь возможна очистка ионного пучка с помощью масс-сепаратора, хорошая адгезия пленок, более высокие, чем при термическом напылении плотность и совершенство структуры.

За счет передачи энергии импульса и ионов в глубь наращиваемой пленки будет происходить ее своеобразное “утрамбовывание”. Возможно, получать пленки с особыми свойствами, которые называются “алмазоподобными”.

Один из путей развития вычислительной техники и систем автоматического управления – это разработка и создание устройств интегральной оптики: световодов, фильтров, модуляторов, ответвителей и др. Преимуществами ионной технологии здесь является возможность введения любой примеси, обеспечение любого профиля распределения примеси или радиационных дефектов, в частности захороненных слоев.

Добавление путем ионного облучения других элементов позволяет резко снизить скорость окисления и ржавления. Легирование поверхностного слоя позволяет получить структуру типа не ржавеющих сталей при поверхностном слое без изменения механических свойств всего материала, например, путем бомбардировки ионами азота.

Бомбардировка металлов ионами инертных газов также уменьшает скорости коррозии и окисления (иногда в 10 раз), поскольку происходящее при этом “разбухание” приповерхностного слоя приводит к возникновению в нем сжимающих напряжений, а, следовательно, закупорке трещин и других каналов поверхностной диффузии.

Имеется и другая возможность пассивации поверхности – создание ино родной защитной пленки, например, пленка создаваемая внедрением ионов азота.

В отличие от металлов, при ионной бомбардировке полупроводников их химическая активность, как правило, повышается, что объясняется большим числом разорванных связей, нарушением структуры и амортизации кристаллов.

Облучение полупроводника через маску с последующим химическим травлением используется для создания рельефа поверхности. При ионном облучении имеет место увеличение геометрических размеров мишени. Такое “разпухание” сопровождается увеличением межатомного расстояния и уменьшением плотности.

Установлено, что кристалл растет только навстречу пучку. Приповерхностный слой обогащается вакансиями и стремится сжаться, поэтому облучен-

ный слой внизу окажется растянутым подложкой, а снаружи – сжатым как бы «стягивающей» корочкой. Такое явление носит название **свеллинг**.

В анизотропных кристаллах наблюдается явление **радиационного роста**, которая состоит в изменении формы кристалла, без заметного изменения его объема.

Вследствие облучения вблизи каждой дислокации возникает поле напряжений, обусловленное деформацией кристаллической решетки. В следствии того, что дислокации оказываются как бы привязанными к своим полям напряжений, называемым **облаками Котрелла**, пластичность кристалла уменьшается, а его предел упругости возрастает. **Ползучесть** или **крип** – это свойства роста пластической деформации со временем при неизменной нагрузке.

Твердость, как способность противостоять вдавливанию или царапанию, в результате облучения ионами растет.

Усталость – разрушение тела под воздействием циклических нагрузок. Усталостное разрушение состоит из двух стадий. При облучении ионами вследствие подавления способности дислокаций к перемещению, предел усталости повышается.

12.5. Электроннолучевая обработка

При взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом происходит множество процессов, в результате которых наблюдается эмиссия атомных частиц, а свойства твердого тела могут существенно измениться. Многие из этих процессов используют в различных электровакуумных приборах. Другая обширная область применения электронных потоков – это использование их в качестве универсального технологического инструмента, позволяющего не только изменять заданным образом свойства обрабатываемых материалов, но и тонко контролировать эти изменения.

Положительной особенностью электронной технологии является сравнительная легкость управления параметрами обработки с помощью электронно-оптических систем. Эти системы формируют моноэнергетический пучок электронов, сфокусированный и направленный в выбранный участок объекта. Если необходимо увеличить площадь облучаемой поверхности, то такой пучок перемещают от участка к участку по заданной программе, или разворачивают в растр. Возможно также использование электронно-оптической системы проекционного типа.

На пути к поверхности заготовки первичные электроны могут терять энергию и изменять направление движения из-за рассеяния на частицах окружающей среды. Такое явление особенно существенно, если в электроннолучевой установке поддерживается достаточно высоким вакуум, или если само электронное облучение сопровождается активным выделением газов и паров из материала обрабатываемого объекта. Что бы не менее 99% электронов доходили до поверхности без взаимодействия с атомами окружающей среды, нужно

поддерживать вакуум в установке на уровне 10^{-2} - 10^{-4} Па и ниже.

При внедрении в вещество электроны испытывают многочисленные акты взаимодействия с его атомами. Эти акты можно разделить на два основных класса – на **упругие** и **не упругие** взаимодействия. Под **упругими** понимают такие взаимодействия, при которых участвующие в них частицы обмениваются кинетической энергией, а их внутренняя энергия не изменяется. В электронно-лучевой технологии электрон, упруго рассеиваясь на атоме твердого тела, не может разорвать его связь с соседями, т. к. его энергия, как правило, не превышает 100-200 кэВ. В результате смещения любого атома при соударении с электроном вызывает соответствующие смещения соседних атомов, и по атомной цепочке распространяется **упругая волна**. Такие волны в кристаллах могут возникать лишь на определенных дискретных частотах, каждой из которых соответствует свой квант энергии – **фонон**. Поэтому в каждом акте упругого рассеяния первичный электрон теряет энергию дискретными порциями, соответствующими возбуждению одного или нескольких фононов.

Такой процесс не является чисто упругим, поскольку он сопровождается возрастанием внутренней энергии твердого тела – энергии тепловых колебаний. Однако, имея ввиду незначительность потери энергии электронов на фононное излучение, такое рассеяние называют **квазиупругим**.

При электронном облучении объекта некоторая часть первичных электронов в результате одного или нескольких актов упругого рассеяния при поверхностных атомах и возвращается в вакуум. Такие электроны называются **упруго отраженными**. Их энергия практически не отличается от энергии первичных электронов. Упруго рассеянные электроны могут наблюдаться и на обратной стороне мишени в числе **прошедших** электронов.

Более обширным классом взаимодействия первичных электронов являются те, в результате которых изменяется не только направление их движения, но и энергия, т. е. происходит их **торможение**. Одна из причин торможения заключается в том, что взаимодействие движущейся заряженной частицы с полем вещества должна сопровождаться с появлением квантов тормозного электромагнитного излучения, которое используется в различных источниках рентгеновских лучей.

Когда электрон пересекает границу раздела двух сред с различными свойствами, возможно появление **переходного** излучения. При очень больших значениях энергии электронного пучка наблюдается **излучение Черенкова**, которое возникает в том случае, когда скорость электронов превышает фазовую скорость распространения электромагнитных волн в данном веществе. Кроме того, в этом случае наблюдается когерентное испускание **рентгеновских квантов**.

Основной механизм торможения первичных электронов в веществе связан с процессами **неупругого рассеяния**, в результате которых возбуждается электронная система вещества заготовки. Различаются два основных типа электрон-электронных взаимодействий в твердом теле: **коллективные** и **одноча-**

стичные.

При **коллективных возбуждениях** первичный электрон взаимодействует с совокупностью валентных электронов твердого тела, которую в таком случае можно рассматривать как электронный газ. При таком возбуждении возникает колебание его электронной плотности на дискретных квантовых частотах, зависящих от концентрации электронов и от свойств материала. Квант энергии плазменных колебаний называют **плазмон** и рассматривают как квазичастицу твердого тела.

Различают два вида плазменных колебаний: объемные и поверхностные. **Поверхностный плазмон** имеет импульс, направленный вдоль границы раздела двух сред. Его энергия меньше, чем энергия объемного плазмона. Время жизни плазмонов не превышает 10^{-16} с. При их распаде выделяется энергия, которая либо уносится электромагнитным излучением, либо передается одному из электронов твердого тела, либо переходит в теплоту. Каждому веществу соответствует значение энергии поверхностного и объемного плазмонов.

Возбуждение плазменных колебаний соответствует рассеянию первичного электрона с малыми изменениями импульса, т. е. рассеянию на малые углы.

При рассеянии на большие углы импульс, передаваемый электроном твердого тела достаточно велик, и в этом случае имеет место другой тип неупругого электрон – электронного рассеяния – **одночастичные взаимодействия**, при которых энергия первичных электронов тратится на ионизацию и возбуждение атомов твердого тела. В каждом акте такого взаимодействия один из электронов твердого тела получает от первичного электрона энергию, достаточную для перехода в состояние с более высокой энергией. На энергетическом уровне, с которого произошел переход, при этом образуется **вакансия**.

Если у возбужденного электрона еще сохраняется энергия достаточная для преодоления поверхностного потенциального барьера, то он может выйти в качестве **вторичного электрона**. Общее количество вторичных электронов, выбиваемых в среднем одним первичным электроном, называется **коэффициентом истинной вторичной электронной эмиссии**, в отличие от полного коэффициента вторичной электронной эмиссии, который учитывает также и вышедшие в вакуум первичные электроны.

Вторично эмиссионные методы базируются также на **оже-процессе**, при котором дискретная порция энергии может быть передана безизлучательным способом от одного электрона к другому электрону твердого тела. В таких спектрах наблюдаются пики при определенных значениях энергии, характерные для данного вещества и не зависящих от энергии первичного пучка.

Неупругие электрон-электронные процессы в твердом теле сопровождаются выходом в вакуум не только вторичных, но и **неупругого отраженных электронов**. Число таких электронов определяется **коэффициентом неупругого отражения**, которые составляет десятки %. В результате часть энергии электронного луча уносится из вещества, что снижает КПД.

В результате того, что большинство возбужденных электронов остается в

твердом теле и сравнительно быстро теряет свою избыточную энергию в многочисленных актах торможения, в зоне проводимости скапливаются неравновесные электроны с тепловыми скоростями, называемые **термолизированными электронами**. В металлах таких электронов значительно меньше, чем электронов проводимости, а в диэлектриках и полупроводниках эти величины сопоставимы. Возрастание проводимости при электроном облучении в результате появления дополнительных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и «дырок» в валентной зоне) называется **радиационной проводимостью** (иногда **наведенной** или **электронно-возбужденной**).

В конечном счете, эти неравновесные электроны исчезают в результате **рекомбинации** с носителями противоположного заряда. Такая рекомбинация может происходить как при непосредственном столкновении электрона и “дырки”, так с промежуточным захватом одного из носителей на локальные ловушечные уровни примесей или дефектов, которые в этом случае играют роль **центров рекомбинации**. Возможны различные процессы преобразования, это энергии рекомбинации, в том числе безизлучательная передача ее одному из электронов твердого тела в результате оже-процесса или передача ее кристаллической решетке с возбуждением фанонов, или, наконец, испускания ее в виде кванта света. В последнем случае возвращение совокупности электронов твердого тела равновесное состояние сопровождается **рекомбинационным излучением**, которое называют люминисценцией, что используется при создании люминисцентных экранов электронно-лучевых приборов.

Если в результате электронных переходов резко возрастает сила отталкивания между соседними атомами, то может произойти необратимое изменение состава облучаемого электронами вещества. К таким процессам относятся **электронно-стимулированная десорбция** чужеродных атомов и молекул, а также **диссоциация химических соединений**, находящихся на поверхности твердого тела.

Электронное облучение может приводить и к противоположному результату, т. е. **образование химических соединений**, если химическая активность атома при его возбуждении возрастает. Электронный поток при этом играет роль катализатора. В ряде случаев электронно-стимулированные процессы играют вредную роль.

Неупругие электрон-электронные взаимодействия могут приводить также к образованию дефектов в объеме кристалла. В ионных кристаллах это может происходить в результате многократной ионизации отрицательно заряженного иона с последующим выталкиванием его из узла решетки, под действием сил кулоновского взаимодействия с соседними ионами. Путь, проходимый первичным электроном до его термолизации называется **траекторным пробегом**. Т. к. этот путь далек от прямолинейного, то важно знать также **глубину проникновения** электронов, которые определяются как проекция траекторного пробега на нормаль поверхности.

Максимум пространственного распределения удельной энергии выделяе-

мой мишени, расположен не на поверхности, а в объеме ее тела. Эта особенность отличает электронное облучение от ряда других способов передачи энергии твердому телу (например, от лазерного излучения).

В результате рассеяния электронов при их проникновении в вещество диаметр электронного пучка увеличивается, и их энергия выделяется при поверхностном объеме образца, близком по форме к сферическому.

Исключительно важную роль в технологии играет **электронно-лучевой нагрев вещества**. Лишь некоторая доля энергии первичного пучка уносится из тела мишени имитированными с ее поверхности электронами, фотонами и атомными частицами, а оставшаяся часть поглощается веществом и, в конечном счете, переходит в теплоту. Как и при любом другом способе нагрева, эта теплота наводится от облучаемого участка за счет теплопроводности материала и теплового излучения поверхности. С ростом энергии электронного пучка тепловой баланс между выделяемой и отводимой энергиями устанавливается при более высокой температуре облучаемого участка. Повышение температуры в свою очередь стимулирует протекание ряда термических процессов: структурных фазовых переходов, отжига дефектов, диффузии, рекристаллизации, плавления, десорбции и испарение с поверхности атомных частиц, термоэлектронной эмиссии.

Особенностью электроннолучевого нагрева является то, что можно достигнуть очень высокой концентрации тепловой энергии при сравнительно малой общей мощности пучка.

Пока нагрев не сопровождается изменением агрегатного состояния вещества, закономерности проникновения электронов в образец при удельной мощности пучка до $10^4 - 10^5$ Вт/см² остаются такими же, как и для маломощных потоков.

Имеющиеся экспериментальные и теоретические данные показывают, что максимум поглощаемой мощности находится на оси пучка, но не на поверхности мишени, а под поверхностью, причем его относительное положение мало меняется при возрастании энергии.

Для аналитической аппроксимации распределение удельных потерь энергии по глубине используется функция Гаусса.

Распределяемая температура облучаемой мишени находится в результате решения неоднородного уравнения теплопроводности, для чего имеются соответствующие компьютерные программы. Простейшим является случай, когда имеется точечный источник, время воздействия которого очень мало, и который порождает температурное поле в бесконечной температурной среде (мгновенный и точечный источник). В этом случае стечением времени график температуры, создаваемой точечным источником как бы оседает и расплывается.

Если представить выделяющуюся мощность $P(x, r, t)$ в виде совокупности точечных источников, распределенных в пространстве и времени, то произведя наложение температурных полей от каждого из них, можно получить полное решение уравнения теплопроводности.

Важными достоинствами электроннолучевой обработки с технологической точки зрения являются:

- 1 Возможность за счет фокусировки луча плавно изменять удельную мощность в зоне нагрева;
- 2 Большая мощность (до мегаватт) в месте взаимодействия луча с заготовкой;
- 3 Удобство управления положением луча и модулирование его мощности;
- 4 Наличие вакуума, как рабочей (защитной) среды;
- 5 Возможность получения малоразмерной прецизионной зоны воздействия луча.

Недостатками являются:

- 1 Необходимость обеспечения высокого вакуума;
- 2 Сложность изготовления и эксплуатации оборудования.

Все основные операции электроннолучевой обработки можно условно разбить на три группы:

- 1 **Плавление** (операции локального переплава, плавка в вакууме);
- 2 **Испарение** (испарение в вакууме, размерная электроннолучевая обработка);
- 3 **Термообработка** без изменения агрегатного состояния вещества

Локальный переплав обрабатываемых поверхностей с помощью электронного луча дает возможность получать чрезвычайно высокие скорости кристаллизации металла в зоне плавления. Образующиеся при этом структуры значительно отличаются от структур, получаемых в обычных условиях. Расширяются границы растворимости для твердых растворов, измельчается микроструктура, значительно повышаются пластичность и твердость. Быстрое остывание расплавленного металла приводит к последующей дополнительной закалке. Включение этих зон в более пластичный основной металл повышает износостойкость поверхности. Иногда такое поверхностное плавление материала называют облагораживающим.

Электроннолучевая плавка или плавка лучом в вакууме применяется тогда, когда необходимо выплавить особо чистые металлы, в том числе химически активные. При этом можно получать более высокий перегрев жидкого металла в ванне и наиболее полно производить дегазацию металла и отгонку летучих примесей, а также осуществить те физико-химические процессы, которые при иных методах плавки не успевают протекать полностью. Особую роль при этом играет вакуум, как защитная среда.

Электроннолучевая сварка. Эта операция является одним из распространенных технологических применений электронного луча. При относительно малых удельных поверхностных мощностях электронного луча форма проплавления имеет такой же вид, как и при традиционных процессах газовой и дуговой сварки. По мере увеличения удельной поверхностной мощности начинается интенсивное испарение металла с поверхности сварочной ванны. Это приводит

к деформации жидкого металла под действием реакции паров, к углублению сварочной ванны и к получению швов с глубоким проплавлением, называемых **кинжальными**. Электроннолучевую сварку целесообразно применять при получении толстостенных конструкций, т. к. можно получить проплавление глубиной 200...300 мм. Кроме того, глубокое проплавление позволяет получать сварные соединения принципиально новой формы, которые нельзя получить иными способами.

Поскольку вакуум это защитная среда при сварке целого ряда химически активных и тугоплавких металлов и сплавов позволяет получить значительно более высокие показатели сварного шва, чем при сварке в защитных газах, сварные конструкции из таких материалов, таких как вольфрам, титан, молибден, цирконий, тантал и др. изготавливаются, в основном, с помощью электроннолучевой сварки.

Малая величина объема ванны расплавленного металла, получаемого при электроннолучевой сварке резко снижает свариваемых деталей. Открывается возможность сваривать конструкции из окончательно обработанных деталей с незначительной последующей обработкой или вовсе без нее. Возможна также сварка термообработанных изделий, например, после закалки. В автомобильной промышленности так изготавливают зубчатые блоки из отдельно обработанных механически и термически шестерен, собранных на валу и закрепленных на валу с помощью электроннолучевой сварки.

Электроннолучевое испарение металлов. Испарение в вакууме материалов при нагреве их электронным лучом для получения тонких пленок. В отличие от других способов испарения, где энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или через высокотемпературный нагревательный элемент, здесь осуществляется прямой нагрев поверхности испаряемого металла, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими материалами.

Размерная обработка электронным пучком. В результате такого рода обработки заготовки получают глухие или сквозные отверстия заданных размеров и заданный контур с определенными допусками. Размерная электроннолучевая обработка основана на том, что при достаточно большой поверхностной удельной мощности скорость испарения и давления пара возрастает на столько, что весь жидкий металл с потоком пара выбрасывается из зоны обработки.

Параметры электроннолучевой размерной обработки связаны с физическими характеристиками материала заготовки (температурой плавления, упругостью пара) и не зависят от его механических свойств (прочности, твердости и пластичности). Поэтому электронный луч нашел применение в первую очередь при обработке твердых металлов – алмазов, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия.

Особой разновидностью размерной электролучевой обработки является **перфорация**, т. е. получение мелких сквозных отверстий, заданной формы и размеров в заданном количестве на единицу площади. Так изготавливают метал-

лические и керамические элементы фильтров, пористый материал для камер ракетных двигателей и лопаток турбин, фильеры и др.

Электроннолучевая термообработка. Этот процесс помогает осуществлять локальный нагрев обрабатываемых участков поверхности с целью структурных превращений (в основном закалки) или для отжига в вакууме с целью увеличения пластичности и очистки поверхности от адсорбированных газов.

Когда зона закалки относительно мала, интенсивность отвода тепла в металл оказывается достаточной для образования закалочных структур. Примером является упрочнение лезвий режущего инструмента из быстрорежущих сталей. В результате чего их рабочий ресурс повышается в два раза.

Термообработка листового материала или фольги производится сканированием луча.

12.6. Светолучевая (лазерная) обработка

Для достижения высоких производительностей и качества, технологических процессах лазерной обработки, к которым относятся лазерная резка, наплавка, термообработка и некоторые другие, необходимо использовать лазерные установки с высокой плотностью мощности излучения. На сегодня лазерное излучение представляет собой наиболее концентрированный источник энергии, превосходящий в этом плане возможности электроннолучевой обработки. Тем не менее, при одинаковой мощности излучения лазерная обработка обеспечивает меньшую глубину проплавления, чем электроннолучевая, что связано с различным характером взаимодействия потоком электронов и фотонов с металлической поверхностью. Кроме того, электроннолучевая обработка требует вакуума, а лазерная может осуществляться в любой газовой среде при атмосферном давлении. Состав газовой среды подбирается специально для соответствующей операции и обрабатываемого металла. Однако, при высоких значениях плотности, мощности лазерного излучения в защитных газах или воздухе в результате возникает низкотемпературная плазма, что ведет к снижению мощности и степени сосредоточенности теплового источника на поверхности материала.

При образовании плазменного факела имеет место развития так называемой лазерной искры, и образование волны горения газа. Волна распространяется в направлении от поверхности навстречу излучению и сопровождается яркой вспышкой света и резким возрастанием шума.

В сильно поглощающем плазменном факеле наблюдается самофокусировка лазерного луча.

При лазерной обработке, связанной с нагревом до высокой температуры, легированных сталей и др. высокоактивных металлов и сплавов, применяют в качестве защитного газа одноатомные инертные газы – аргон и гелий. При тепловой лазерной обработке низколегированных сталей, а также ряда конструкци-

онных материалов в качестве защитной среды используют углекислый газ, азот и воздух.

При обработке лазерным лучом в среде защитных газов возникающая плазма оказывает экранизирующее воздействие, и при рефракции лазерного луча в плазме происходит его перефокусировка. Возникающий при взаимодействии лазера с металлом пар оказывает заметное воздействие на оптический разряд в газе. При этом происходит снижение эффективного потенциала ионизации и увеличение коэффициента поглощения излучения. В результате экранирования проплавляемого участка происходит остановка процесса испарения. Затем эрозионный плазменный факел разлетается вследствие нагрева поглощаемым им излучением, мощность потока излучения, падающего на поверхность металла, возрастает до первоначального значения, и может опять возникнуть оптический разряд. Таким образом, процесс проплавления металла является периодическим.

Световой поток лазерного излучения, направленный на обрабатываемую поверхность, частично отражается от нее, а частично проходит вглубь тела. Излучение, проникающее вглубь тела практически полностью поглощается свободными электронами проводимости при поверхностном слое, толщина которого составляет 0,1-1 мкм.

Основная доля теплоты при лазерном нагреве переносится вглубь металла посредством электронной проводимости, т. е. также как и при традиционных способах теплового воздействия.

Энергетическое воздействие лазерной обработки может быть значительно повышено соответствующей обработкой поверхности.

Изменение шероховатости поверхности не всегда является технологически оправданной операцией, тогда как использование специальных поглощающих покрытий, безусловно, оправдано.

Универсального покрытия, одновременно удовлетворяющего простоты получения, высоких температур плавления и испарения, высокой теплопроводности и хорошей адгезии к металлу, пока не найдено.

Находят применение следующие типы покрытий:

- химические покрытия: фосфотирование марганцем или цинком, сульфидирование, оксидирование и др.;
- красящие составы, содержащие оксиды металлов алюминия, цинка и др.;
- коллоидные растворы углерода в ацетоне, спирте и др.;
- напыленные оксиды различных металлов;
- сажа, получаемая на поверхности при сжигании резины, масел и др.

Такие покрытия становятся обязательным условием при операциях лазерной поверхностной термообработки, особенно гладких, шлифованных поверхностей.

В большинстве случаев лазерной сварки и резки поглощающее покрытие не используется. Интенсивность нагрева при углубленном “кинжальном” про-

плавлении возрастает в следствие поглощения излучения стенками узкого и глубокого канала.

По количеству энергии, вводимой в единицу объема обрабатываемого материала основные виды лазерной обработки можно располагать в следующей последовательности (в порядке возрастания вводимой энергии): поверхностная термообработка, лазерная сварка, лазерная резка. Между этими видами лазерной обработки нет четко установленной количественной границы и анализ процессов можно проводить с общих теплофизических позиций.

Эффективность использования лазерного излучения можно характеризовать эффективным КПД процесса.

В случае поверхностной термообработки без распыления эффективный КПД совпадает с коэффициентом поглощения, а при лазерной обработке, связанной с расплавлением металла – с эффективным коэффициентом поглощения.

Основные закономерности влияния тех или иных факторов на уровень эффективного КПД получены экспериментально.

Так, для операции сварки установлено, что когда сварку осуществляют на уровне мощности, близкому к максимальному, увеличение скорости сварки к значительному изменению эффективности КПД. Сварка при этом ведется с защитной лицевой стороны – гелием, а корня шва – аргоном.

Эффективный КПД зависит также от скорости сварки. Это связано с влиянием размеров и формы парогазового канала на поглощающую способность лазерного излучения. В случае сварки с повышенной мощностью происходит интенсивное расплавление металла с образованием сквозного канала. Но в таком случае часть излучения проходит по каналу насквозь металла без передачи энергии кромкам. Вследствие этих потерь тепловая эффективность процесса оказывается низкой, хотя наблюдается нормальное формирование сварочного шва. С увеличением скорости сварки сквозной канал последовательно сужается, а затем исчезает. Сечение шва носит ярко выраженный характер “кинжального” проплавления, обеспечивается максимальная эффективность процесса с наибольшими значениями КПД. При дальнейшем увеличении скорости сварки несколько уменьшается глубина проплавления, ухудшается условие поглощения лазерного излучения в канале проплавления, что приводит к некоторому уменьшению значения эффективного КПД.

Существует и может быть определена расчетным путем плотность мощности излучения, которую следует рассматривать как нижний предел плотности энергии при сварке. При меньших значениях следует проводить термообработку, включая и режимы, связанные с наплавлением поверхности. Сварка в этом режиме не эффективна вследствие малой величины проплавления.

Выбор защитного газа оказывает влияние на показатели процесса. Так, изменение состава защитной атмосферы при переходе с CO_2 и $\text{Ar} + \text{He}$ приводит к снижению эффективности сварки.

Изменение положения в фокальной плоскости приводит к изменению концентрации энергии на свариваемых кромках и характера плазменных про-

цессов в факеле. Максимальное значение эффективности достигается при некотором “заглублении” фокуса под поверхность.

Значительное значение эффективности проплавления лазерным лучом достигается при сварке в осциллирующем режиме, который осуществляется периодическим заглублением фокуса луча в сварочную ванну, что должно быть согласовано со скоростью фронтов плавления и испарения.

Особенностью глубокого проплавления при лазерной сварке является то, то температура стенок канала мало изменяется по глубине. Однако, мощность излучения, поглощаемого в канале проплавления, уменьшается экспоненциально по глубине канала. Но в глубине канала, где мощность излучения меньше, тем меньше и скорость заглубления, и площадь зоны прямого заглубления подвергается воздействию источника в течение более длительного времени.

При лазерной обработке необходимо следить за технологической прочностью обрабатываемых металлов. Под технологической прочностью подразумевают способность металлов сопротивляться разрушениям в процессе технологической обработки.

Применительно к лазерной обработке различают следующие виды технологической прочности:

- способность наплавленного металла, металла сварного шва и околошовной зоны воспринимать термодеоформационное воздействие при высоких температурах в процессе лазерной обработки с расплавлением металла без образования горячих трещин;
- формирование свойств металла, обработанного лазерным излучением, на стадии охлаждения, без образования холодных трещин в процессе фазовых и структурных превращений в твердом состоянии.

В процессе кристаллизации твердожидкой фазе происходит изменение механических свойств сплава. В начальной стадии кристаллизации имеет место большой объем жидкой фазы, а остальные кристаллы разделены жидкой прослойкой. В этом состоянии структура характеризуется высокой пластичностью, определяемой свойствами жидкости.

При последующем снижении температуры происходит увеличение объема твердой фазы и соответствующее уменьшение жидкой фазы. Если при этом кристаллы образуют каркас, препятствующий циркуляции жидкости, то возникающие деформации могут приводить к хрупкому межкристаллическому разрушению.

При дальнейшем охлаждении кристаллы, разливаясь, образуют сплошной каркас. Межкристаллическое разрушение переходит во внутри кристаллическое разрушение вязкого характера. Таким образом, в процессе кристаллизации можно выделить характерный интервал температур, в котором прочность и пластичность весьма малы, так называемый интеграл хрупкости (ТИХ). Именно в этом интервале температур наиболее вероятно образование разрушений.

Основными факторами, определяющими образование горячих трещин при сварке и наплавке, является: темп упругопластических деформаций при

охлаждении расплавленного металла, значение температурного интервала хрупкости (ТИХ) и минимальная пластичность металла в этом интервале.

Типовыми лазерной технологии является:

- нагрев, связанный с поверхностной термообработкой отдельных зон поверхностей и последующим их охлаждением в любых средах (вода, воздух, эмульсия и т. п.) это позволяет избирательно термоупрочнять поверхность изделий и склонных к закалке материалов (чугун, сталь и т.д.);

- нагрев для отжига фольги при больших скоростях ее движения.

- нагрев в узкой зоне без плавления (лазерное скрайбирование) с целью разделения хрупких материалов (стекла, керамики, полупроводниковых пластин по линии нанесения риски). Кроме того, создавая направленные термические напряжения, можно вести процесс термораскалывания (самопроизвольного);

- плавление, локальный переплав и быстрое охлаждение позволяющие получить структуры, которые иначе получить нельзя. Быстрое охлаждение для массивных деталей достигается теплоотводом в материал;

- лазерная сварка, как процесс, связанный с локальным плавлением, конкурирующая как с традиционными процессами, так и с электроннолучевой сваркой. Наиболее часто лазерная сварка применяется для малогабаритных деталей и конструкций из тонколистовых материалов. Применяется точечная сварка и шовная сварка герметичным швом. Сравнительно небольшой разогрев позволяет осуществлять герметизацию корпусов, заполненных веществами, разогревать которые недопустимо, например, герметизированных корпусов аккумуляторов;

- сварка не металлических материалов (в том числе таких, пропускающих видимое излучение, как стекло, керамика и др.), осуществляющаяся за счет хорошего поглощения или излучения с большой длинной волны. По такой технологии изготавливают, например корпуса медицинских термометров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из основных факторов качественной подготовки специалистов с высшим образованием является совершенное научно-методическое обеспечение учебного процесса.

Поэтому целью учебного пособия является разработка учебно-методических материалов для освоения дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

В процессе разработки учебно-методического обеспечения нами, в соответствии с заданием, рассмотрены следующие разделы:

1. Основы металлургического производства;
2. Материалы, применяемые в машиностроении;
3. Основные способы получения заготовок;
4. Обработка металлов резанием;
5. Сварочное производство;
6. Термическая обработка деталей горных машин;
7. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов;
8. Обработка абразивным инструментом;
9. Обработка лезвийным инструментом;
10. Инструментальные материалы.

Учебно-методическое обеспечение, выполнено в твёрдой и электронной версиях, построено таким образом, что позволяет качественно усвоить изложенный материал с демонстрацией любых изображений: графиков, схем, чертежей и др.

Таким образом, в заключении, отмечено, что выполненное нами учебное пособие позволит существенно повысить качество усвоения студентами дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНАЯ:

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов/ Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин. Под ред. Г.П. Фетисова. - 3-е изд., испр. и доп. - М.: Высш. шк., 2005. - 862 с.
2. Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов [Текст]: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов / А.М. Дальский и др.; под общ. ред. А.М. Дальского. - М.: Машиностроение, 2002. - 447 с.
3. Технология конструкционных материалов. [Текст]: Учеб. пособие для вузов /М.А. Шатерин и др., под общ. ред. М.А.. Шатерина. - С.-Пб: Политехника, 2005. - 597 с.
4. Ржевская, С.В. Материаловедение [Текст]: Учеб. пособие для вузов / С.В. Ржевская. - М.: изд-во МГГУ, 2003. - 304 с.
5. Материаловедение [Текст]: Учеб. для вузов /Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред Б.Н. Арзамасова. - М.: изд-во МГТУ им. И.Э. Баумана, 2002. - 648 с.

Дополнительная:

6. Шубина, Н.Б. Материаловедение в горном машиностроении. [Текст]: /Н.Б. Шубина. - М.: изд-во МГГУ, 2000. - 272 с.
7. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов. [Текст]: /И.И. Новиков. - М.: Металлургия, 1986. - 480 с.
8. Верещака, Д.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями [Текст]: /Д.С. Верещака. - М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.
9. Карпман М.Г Основы литейного производства и обеспечение технологичности отливок [Текст]: /М.Г. Карпман, В.Д. Ровнова, Г.С Тибрин. Под общ. ред. М.Г. Карпмана. - М.: изд-во МАИ, 1992. - 91 с.
10. Старков, В.К. Обработка резанием. [Текст]: / В.К. Старков. - М.: Машиностроение, 1989. - 291 с.
11. Стернин, И.С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки [Текст]: Учебн.пособие: С.-Пб.: Политехника, 2003. – 344 с.
12. Зуев, А.А. Технология машиностроения [Текст]: Учеб. Для студентов вузов. - С.-Пб.: Изд-во «Лань», 2003. – 496 с.
13. Рогов, В.А. Основы высоких технологий [Текст]: Учеб.пособие для студентов вузов/В.А. Рогов, Л.А. Ушомирская, А.Д. Чудаков. – М.: Вузовская книга, 2001. – 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	3
1.1. Современное металлургическое производство чугуна и стали.....	3
1.2. Материалы для производства чугуна и стали.....	4
1.3. Производство чугуна.....	5
1.3.1. Технология доменной плавки.....	6
1.3.2. Устройство и работа доменной печи.....	6
1.3.4. Продукты доменной плавки.....	9
1.3.5. Техничко-экономические показатели доменной печи.....	10
1.4. Производство стали.....	11
1.4.1. Сущность процесса.....	11
1.4.2. Производство стали в конверторах.....	11
1.4.3. Производство стали в мартеновских печах.....	16
1.4.4. Производство стали в электропечах.....	20
1.4.5. Разливка стали на слитки.....	25
1.4.6. Способы повышения качества стали.....	27
Техничко-экономические показатели процесса внепечной обработки стали.....	28
1.5. Производство цветных металлов.....	28
1.5.1. Производство меди.....	28
Пирометаллургический способ производства меди	28
1.5.2. Производство алюминия.....	30
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	32
2.1. Металлические материалы.....	32
2.1.1. Сплавы черных металлов.....	32
2.1.2. Сплавы цветных металлов.....	40
2.2. Неметаллические материалы.....	41
2.3. Композиционные материалы.....	42
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК.....	43
3.1. Получение заготовок методами литья.....	43
3.1.1. Плавильные агрегаты.....	43
3.1.2. Литейные свойства сплавов.....	45
3.1.3. Литье в песчаные формы.....	46
3.1.4. Техничко-экономическое обоснование литья в песчано-глинистые формы.....	50
3.2. Специальные способы литья.....	50
3.2.1. Литье в оболочковые формы.....	50
3.2.2. Литье по выплавляемым моделям.....	52
3.4.3. Литье в металлические формы.....	54
3.4.4. Литье под давлением.....	55
3.4.5. Центробежное литье.....	57
Техничко-экономическое обоснование центробежного литья.....	58
3.4.6. Другие способы литья.....	59
3.5. Дефекты отливок.....	62
3.6. Отходы литейного производства.....	65
3.3. Получение заготовок методами обработки металлов давлением.....	66
3.3.1. Теоретические основы обработки металлов давлением.....	67
3.3.2. Прокатка.....	74
3.2.3. Производство сортового проката.....	76
3.3.3. Ковка.....	80
3.3.4. Штамповка.....	86
3.3.5. Волочение.....	98
ГЛАВА 4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	101
4.1. Свойства инструментальных материалов.....	101
4.2. Инструментальные стали.....	101
4.3. Твердые сплавы.....	102
4.4. Сверхтвердые и керамические материалы.....	102

4.5. Абразивные материалы.....	103
ГЛАВА 5. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ.....	104
5.1. Кинематические и геометрические параметры резания.....	104
5.1.1. Физические основы обработки металлов резанием.....	104
ГЛАВА 6. ОБРАБОТКА ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ.....	118
6.1. Metallорежущие станки.....	118
6.1.1. Классификация металлорежущих станков.....	118
6.2. Обработка заготовок на токарных станках.....	120
6.2.1. Характеристика метода точения.....	120
6.2.2. Типы токарных станков.....	121
6.2.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления заготовок	123
6.2.4. Основные виды токарных работ.....	124
6.3. Обработка заготовок на сверлильных и расточных станках.....	125
6.3.1. Характеристика метода сверления.....	125
6.3.2. Типы сверлильных станков.....	126
6.3.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления инструмента и заготовок.....	127
6.3.4. Основные виды работ, выполняемых на сверлильных станках	129
6.3.5. Назначение и типы расточных станков.....	130
6.3.6. Режущий инструмент и схемы обработки заготовок на расточных станках.....	132
6.4. Обработка заготовок на фрезерных станках.....	133
6.4.1. Характеристика метода фрезерования.....	133
6.4.2. Типы фрезерных станков.....	134
6.4.3. Режущий инструмент и технологическая оснастка фрезерных станков.....	135
6.4.4. Схемы обработки заготовок на фрезерных станках.....	136
6.5. Обработка заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках.....	137
6.5.1. Характеристика методов строгания, долбления и протягивания.....	137
6.5.2. Строгальные, долбежные и протяжные станки	138
6.5.3. Режущий инструмент для строгания, долбления и протягивания	140
6.5.4. Схемы обработки заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках.....	141
ГЛАВА 7. ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ.....	143
7.1. Обработка поверхностей абразивным инструментом.....	143
7.1.1. Характеристика метода шлифования.....	144
7.1.2. Основные типы шлифовальных станков.....	145
7.1.3. Режущий абразивный инструмент.....	146
7.1.4. Схемы обработки.....	146
7.1.5. Отделочная обработка поверхностей шлифовальными кругами и чистовыми резцами.....	150
7.1.6. Полирование.....	150
7.1.7. Абразивно-жидкостная отделка.....	151
7.1.8. Притирка.....	152
7.1.9. Хонингование.....	153
7.1.10. Суперфиниширование.....	154
ГЛАВА 8. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА.....	156
ГЛАВА 9. Наплавка и НАПЫЛЕНИЕ.....	187
9.1. Вибродуговая наплавка.....	187
ГЛАВА 10. Пайка материалов.....	197
10.1. Способы пайки.....	198
ГЛАВА 11. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН.....	207
11.1. Закалка стали.....	207
Условия охлаждения стали при закалке.....	210
Прокаливаемость стали.....	211
Способы закалки стали.....	212
Поверхностная закалка.....	213
11.2. Отпуск стали.....	215

11.3. Отжиг стали.....	216
11.4. Химико - термическая обработка.....	218
Цементация.....	219
Азотирование.....	220
Нитроцементация.....	221
ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	
.....	223
12.1. Электроэрозионные методы обработки.....	223
12.1. Электрохимические методы обработки.....	224
12.3. Плазменная обработка.....	225
12.4. Ионно-вакуумная обработка.....	228
12.5. Электроннолучевая обработка.....	234
12.6. Светолучевая (лазерная) обработка.....	241
заклучение.....	246
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	247
.....	247
Основная:.....	247
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	248