



**К. Г. Герасимович, Ю. А. Евтюшкин,
Н. И. Фомин, И. А. Хворова**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Часть 2

Учебное пособие

Второе издание, исправленное

Томск 2004



УДК 669.018.29.004 (075.8)

Герасимович К.Г., Евтюшкин Ю.А., Фомин Н.И., Хворова И.А. Технологические процессы машиностроительного производства. Ч. 2: Учебное пособие. – 2-е изд., испр. – Томск: Изд. ТПУ, 2004. – 140 с.

Учебное пособие включает две части. В первой части рассматриваются основы металлургического производства, литейного производства и обработки металлов давлением. Вторая часть посвящается обработке металлов резанием и сварочному производству.

Пособие подготовлено на кафедре «Материаловедение и технология металлов» ТПУ на основании лекций, прочитанных авторами студентам дневной формы обучения. Пособие соответствует программе дисциплины и предназначено для студентов ИДО, обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение».

Разделы 1 и 5 написаны Ю.А.Евтюшкиным, раздел 2 – И.А.Хворовой, раздел 3 – К.Г.Герасимовичем, раздел 4 – Н.И.Фоминим, компьютерная графика выполнена И.А. Хворовой.

Печатается по постановлению Редакционно-издательского Совета Томского политехнического университета.

Рецензенты:

Б.П.Романов – доцент кафедры прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, доктор технических наук;

П.С.Симонов – главный инженер ЗАО «Томский инструмент»

Темплан 2004

© Томский политехнический университет, 2004



4. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

4.1. Физические основы обработки металлов резанием

4.1.1. 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 V_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. 4.1, 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.

4.1.2. Методы формообразования поверхностей

Пространственную форму детали определяет сочетание различных геометрических поверхностей: плоских, круговых цилиндрических и кони-

ческих, 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).

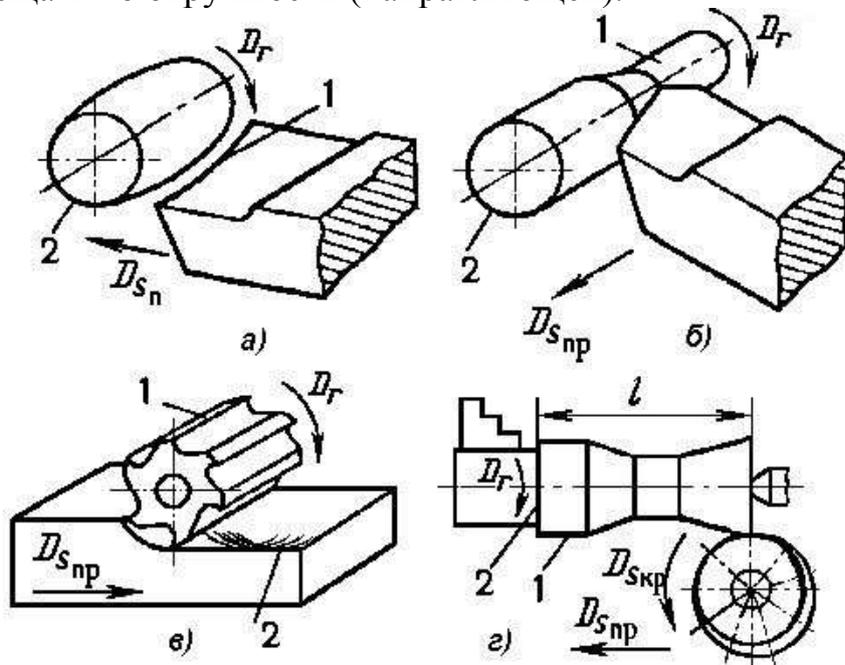


Рис. 4.1. Схемы формообразования поверхностей заготовок

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. 4.1, 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. 4.1, б). Формообразующими являются движения резания.

При образовании поверхностей по **методу касания** образующей линией 1 является режущая кромка инструмента (рис. 4.1, в), а направляющей линией 2 служит касательная к ряду вспомогательных линий – траекториям то-



чек режущей кромки инструмента. Формообразующим является движение подачи.

При образовании поверхностей по *методу обкатки* направляющая линия 2 воспроизводится вращением заготовки. Образующая линия 1 является огибающей кривой к ряду последовательных положений режущей кромки инструмента относительно заготовки благодаря согласованию двух движений подачи (рис. 4.1, г). Скорости движений согласуются так, что за время прохождения круглым резцом расстояния l он делает один полный оборот относительно своей оси вращения.

4.1.3. 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:

$$V = \pi \cdot D_{\text{заг}} \cdot n \cdot 10^{-3} \text{ (м/мин)},$$

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 t (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 обработки – 6,3–0,4; для отделочной и доводочной обработки – 0,2–0,012.

4.1.4. 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. 4.2) состоит из *крепежной части* (державки) II, при помощи которой он крепится в резцедержателе, и *режущей части* I, которую образуют следующие элементы: 1 – передняя поверхность $A\gamma$; 2 – главная режущая кромка K ; 3 – вспомогательная режущая кромка K' ; 4 – главная задняя поверхность $A\alpha$; 5 – вспомогательная задняя поверхность $A\alpha'$; 6 – вершина.

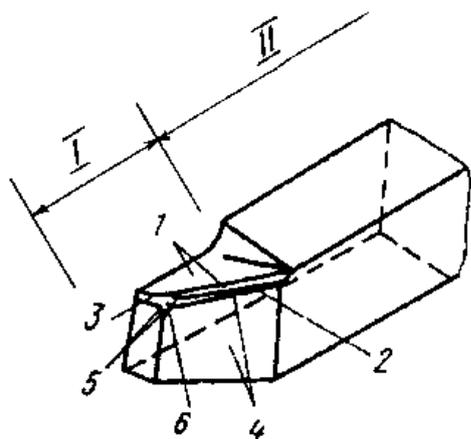


Рис. 4.2. Элементы токарного резца

Расположение поверхностей режущей части резца задается углами, для определения которых вводят *статическую систему координат* (рис. 4.3). 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.

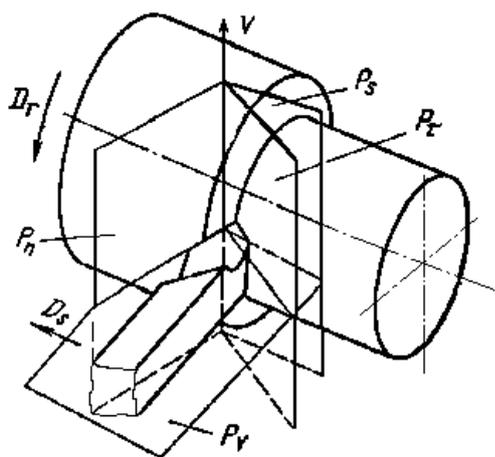


Рис. 4.3. Координатные плоскости при точении

В главной секущей плоскости измеряют: 1) *главный передний угол* γ – угол между передней поверхностью и основной плоскостью (рис. 4.4). 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 по-

верхностью 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.

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 вышперечисленных 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.

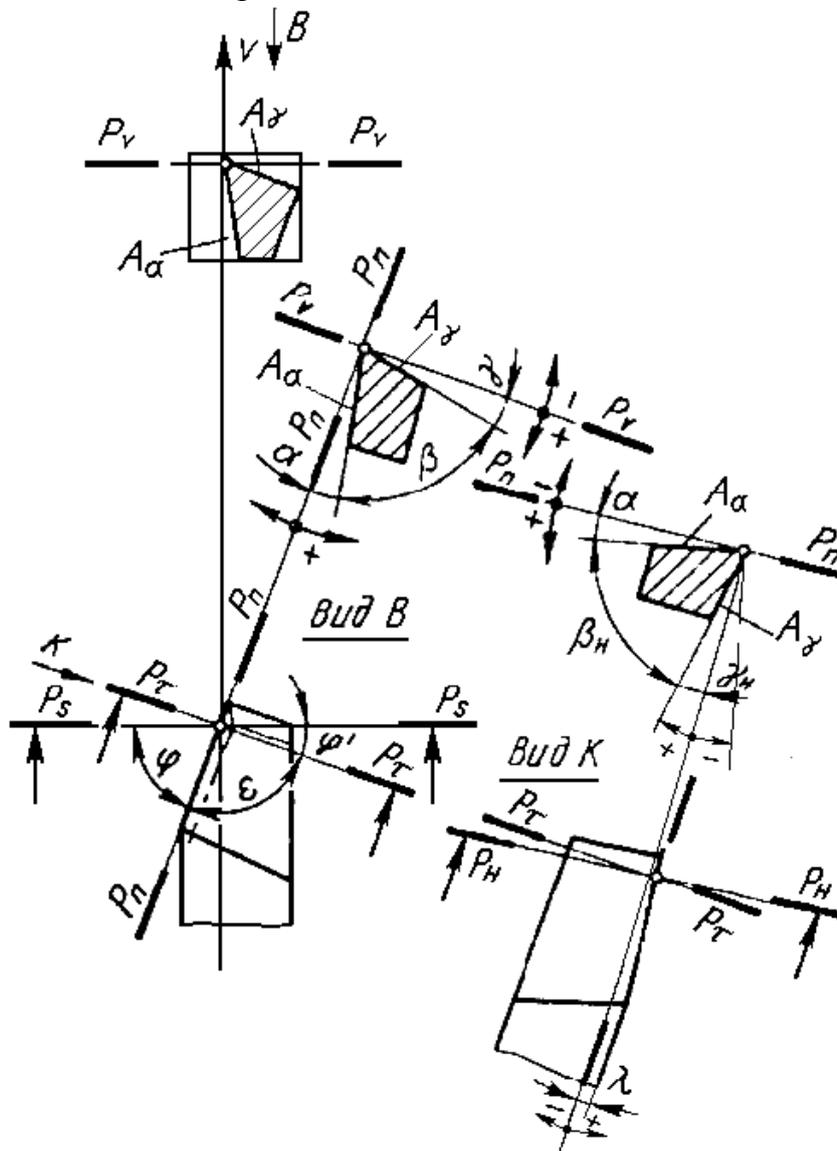


Рис. 4.4. Углы токарного резца

4.1.5. 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. 4.5, а, зона I). При дальнейшем движении резца упругие деформации, увеличиваясь по абсолютному значению, переходят в *пластические* (рис. 4.5, а, зона II). В прирезцовом срезаемом слое материала заготовки возникает сложное упругонапряженное состояние. Такое состояние приводит к смещению зерен металла друг относительно друга – *сдвиговым деформациям* (рис. 4.5, а). В результате этого сдвигается элементарный объем металла по *плоскости скалывания* O–O и образуется элемент стружки *e* (рис. 4.5, б). Далее процесс повторяется, и образуется следующий элемент (рис. 4.5, в).

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.

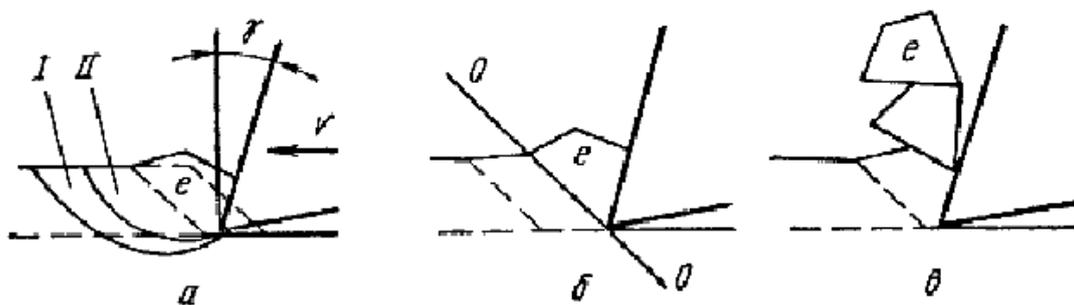


Рис. 4.5. Процесс образования стружки

Выделяют следующие виды стружки: сливную, суставчатую, элементную. *Сливная стружка*, образуемая при резании пластичных металлов, представляет собой сплошную ленту с гладкой прирезцовой стороной, на внешней стороне стружки заметны слабые пилообразные зазубрины. *Суставчатая стружка*, образуемая при резании металлов средней твердости, представляет собой ленту с гладкой прирезцовой стороной, а на внешней стороне имеет ярко выраженные зазубрины (рис. 4.5, 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.

4.1.6. 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 R 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. 4.6).

Составляющая силы резания P_z 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*.

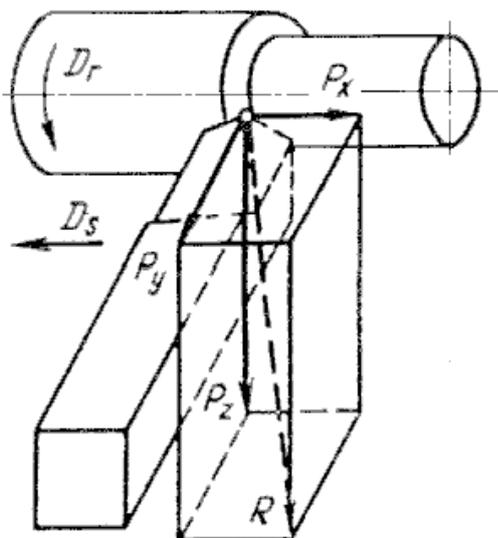


Рис. 4.6. Силы резания при точении

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.

4.1.7. 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. 4.7). 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.

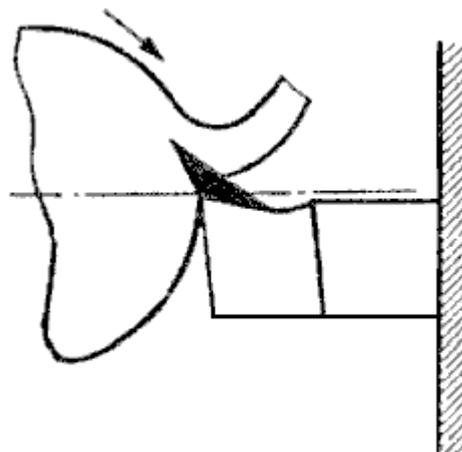


Рис. 4.7. Схема образования нароста

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.

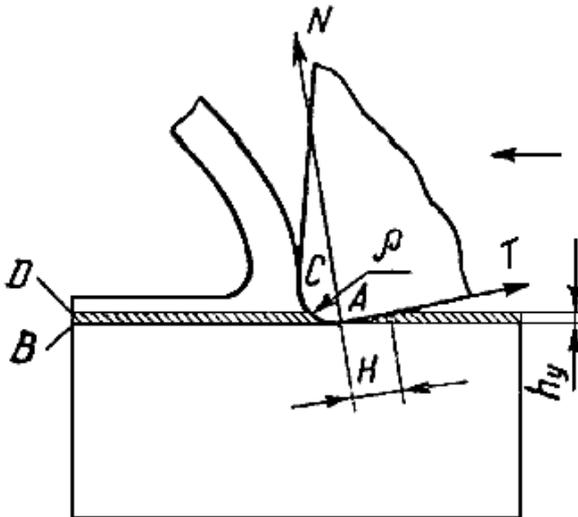
Но нарост увеличивает шероховатость обработанной поверхности и уменьшает геометрическую точность обработанной заготовки вследствие изменения вылета резца. Изменение переднего угла вызывает изменение силы резания, что приводит к вибрации станка, а это ухудшает качество обработанной поверхности.

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.

4.1.8. 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. 4.8), который при обычных методах заточки составляет примерно 0,02 мм. Следовательно, инструмент может срезать с 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 АВ и CD, будет упругоупластически деформироваться.

Рис. 4.8. Схема упрочнения при резании

При работе инструмента радиус ρ быстро растет вследствие затупления режущей кромки, и расстояние между линиями АВ 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*, на-



против, 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.

4.1.9. 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, режима 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 результа-

те 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.

4.1.10. 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. 4.9.

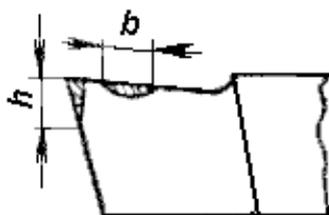


Рис. 4.9. Характер изнашивания токарного резца

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 заго-



товки, 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.

4.1.11. 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.

4.1.12. 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 (см. п. 4.1.3).

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 $\approx 80\%$ припуска, при втором (чистовом) – $\approx 20\%$ 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 оп-



ределяют 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.

4.2. Инструментальные материалы

4.2.1. 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.

4.2.2. Инструментальные стали

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,7–1,3 % С. Для режущих инструментов применяют стали У9А, У10А, У11А 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.

4.2.3. 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 теплоустойчивость 800–1250 °С, 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.

4.2.4. 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.

4.2.5. 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). Наиболее 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.

4.3. Металлорежущие станки

4.3.1. 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 – сверлиль-



ные 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 3Ш185 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.

4.3.2. 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 подач. 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. 4.10), движений подач и ускоренных перемещений. Переключением электромагнитных муфт $M_{э1} - M_{э4}$ 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.

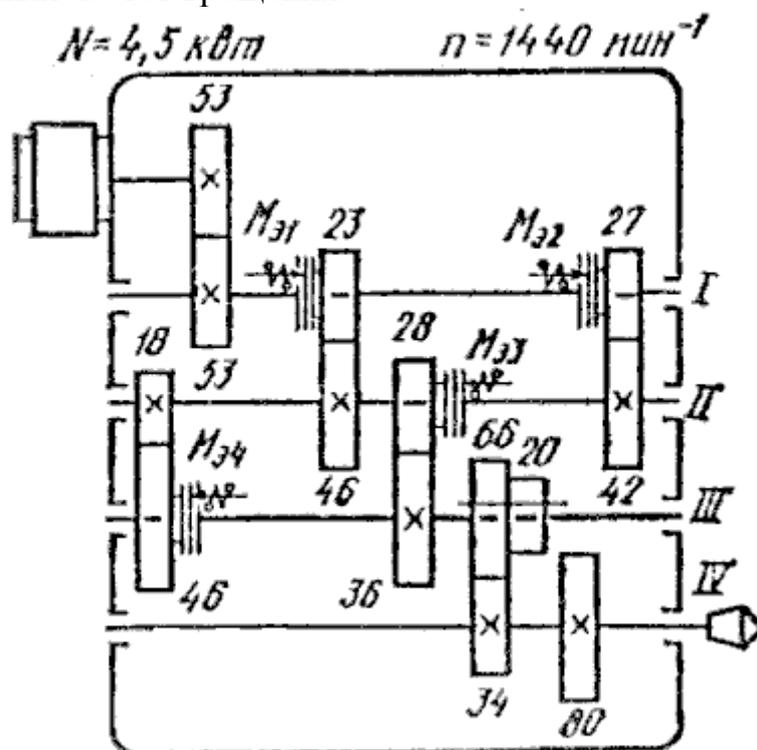


Рис. 4.10. Кинематическая цепь главного движения резания

4.4. Обработка заготовок на токарных станках

4.4.1. 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.

4.4.2. Типы токарных станков

По технологическому назначению станки токарной группы делятся на типы. *Токарно-винторезные станки* (рис. 4.11, а) применяют в условиях единичного производства для обработки небольших партий заготовок.

Токарно-револьверные станки (рис. 4.11, 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. 4.11, 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. 4.11, е) предназначены для обработки наружных поверхностей заготовок типа ступенчатых валов, обработка нескольких поверхностей заготовки ведется одновременно. *Одношпиндельные токарно-револьверные автоматы* (рис. 4.11, 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. 4.11, д) используются в массовом производстве, число одновременно обрабатываемых заготовок равно числу шпинделей. *Многошпиндельные автоматы последовательной обработки* (рис. 4.11, 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.

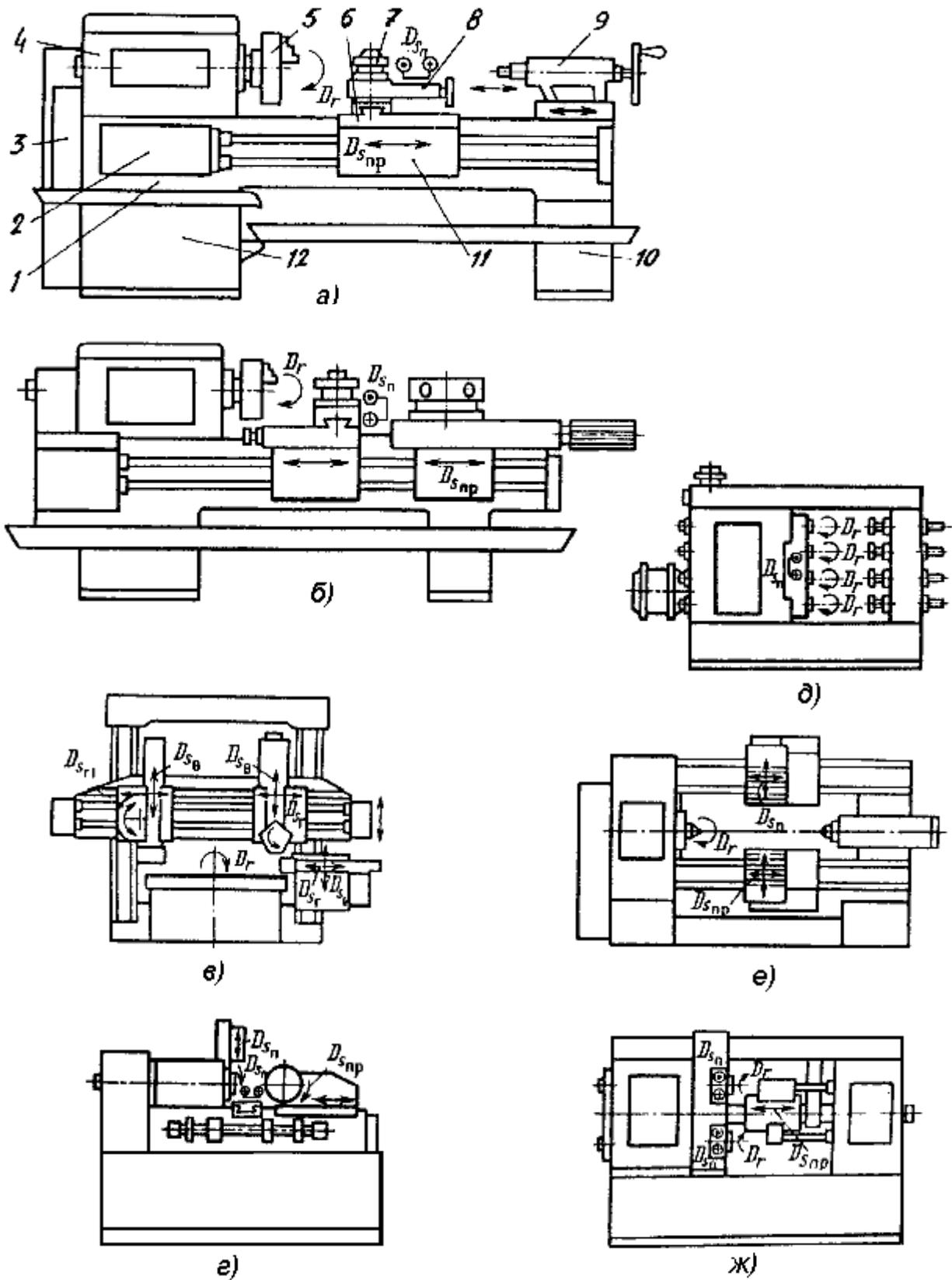


Рис. 4.11. Общие виды станков токарной группы

Токарно-винторезный станок (рис. 4.11, 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).

4.4.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления заготовок

Основным принципом классификации токарных резцов является их технологическое назначение. Различают резцы (рис. 4.12): *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.

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 заготовку центруют, т. е. сверлят *центровые отверстия* с торцов вала специальными центровочными сверлами. *Центры* бывают *упорные* (рис. 4.12, б), *срезанные* (рис. 4.12, в), *шариковые* (рис. 4.12, 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. 4.12, д) – при обработке заготовок небольших диаметров. *Вращающиеся центры* (рис. 4.12, е) применяют при большой глубине резания, когда возникают значительные силы резания.

Поводковый патрон (рис. 4.12, ж) и хомутик (рис. 4.12, з) используют для передачи крутящего момента от шпинделя станка на заготовку, закрепленную в центрах.

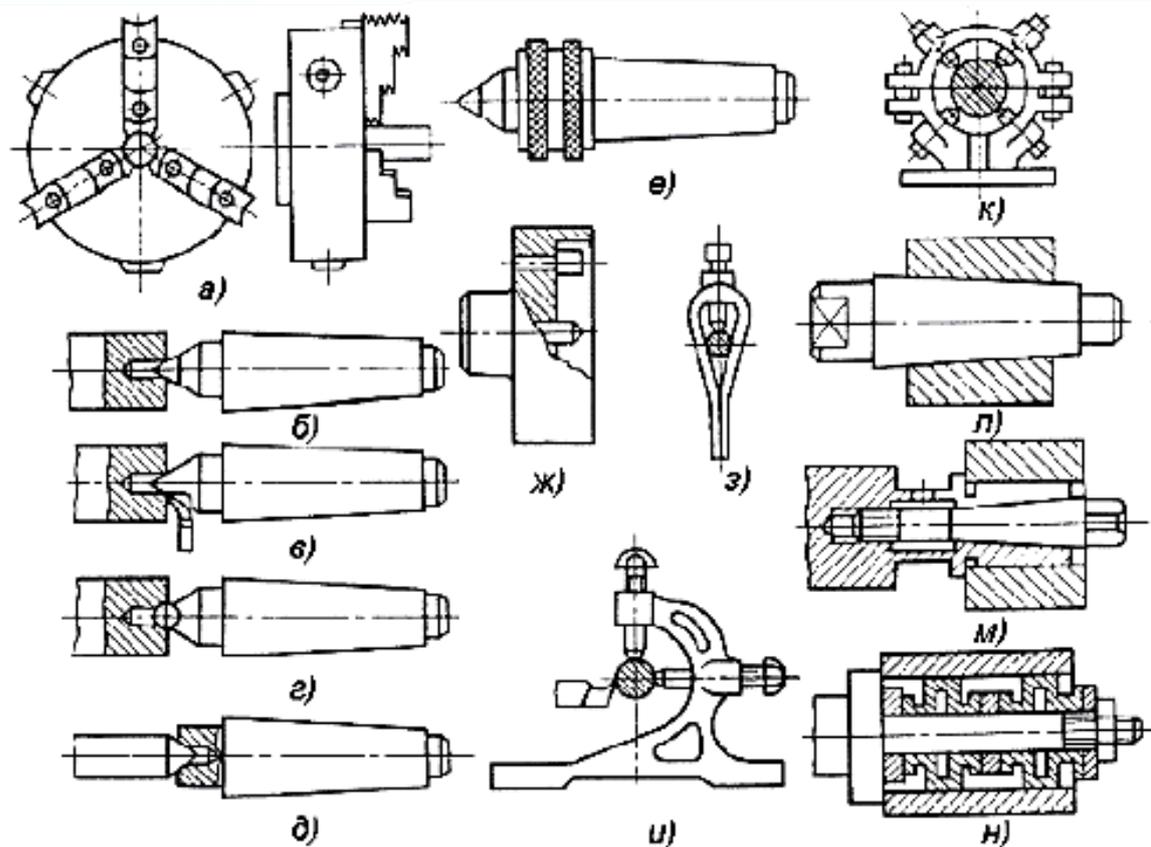


Рис. 4.12. Приспособления для закрепления заготовок на токарных станках

При отношении $l/d > 10$ для уменьшения деформации заготовок применяют люнеты. *Подвижный открытый люнет* (рис. 4.12, и) устанавливают на продольном суппорте станка, *неподвижный закрытый люнет* (рис. 4.12, 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. 4.12, л, м, н). На токарно-револьверных станках, полуавтоматах и автоматах для закрепления заготовок-прутков используют *цанговые патроны*.

4.4.4. Основные виды токарных работ

Схемы основных видов обработки поверхностей, приведенные на рис. 4.13, являются типовыми, так как их можно реализовать на универсальных токарных станках, полуавтоматах, автоматах и станках с ЧПУ.

Наружные цилиндрические поверхности обтачивают прямыми (рис. 4.13, б) или упорными ($\gamma=90^\circ$) проходными резцами. Использование упорных резцов приводит к нулю радиальную составляющую силы резания F_r , что снижает деформацию заготовок в процессе обработки и повышает их точность.

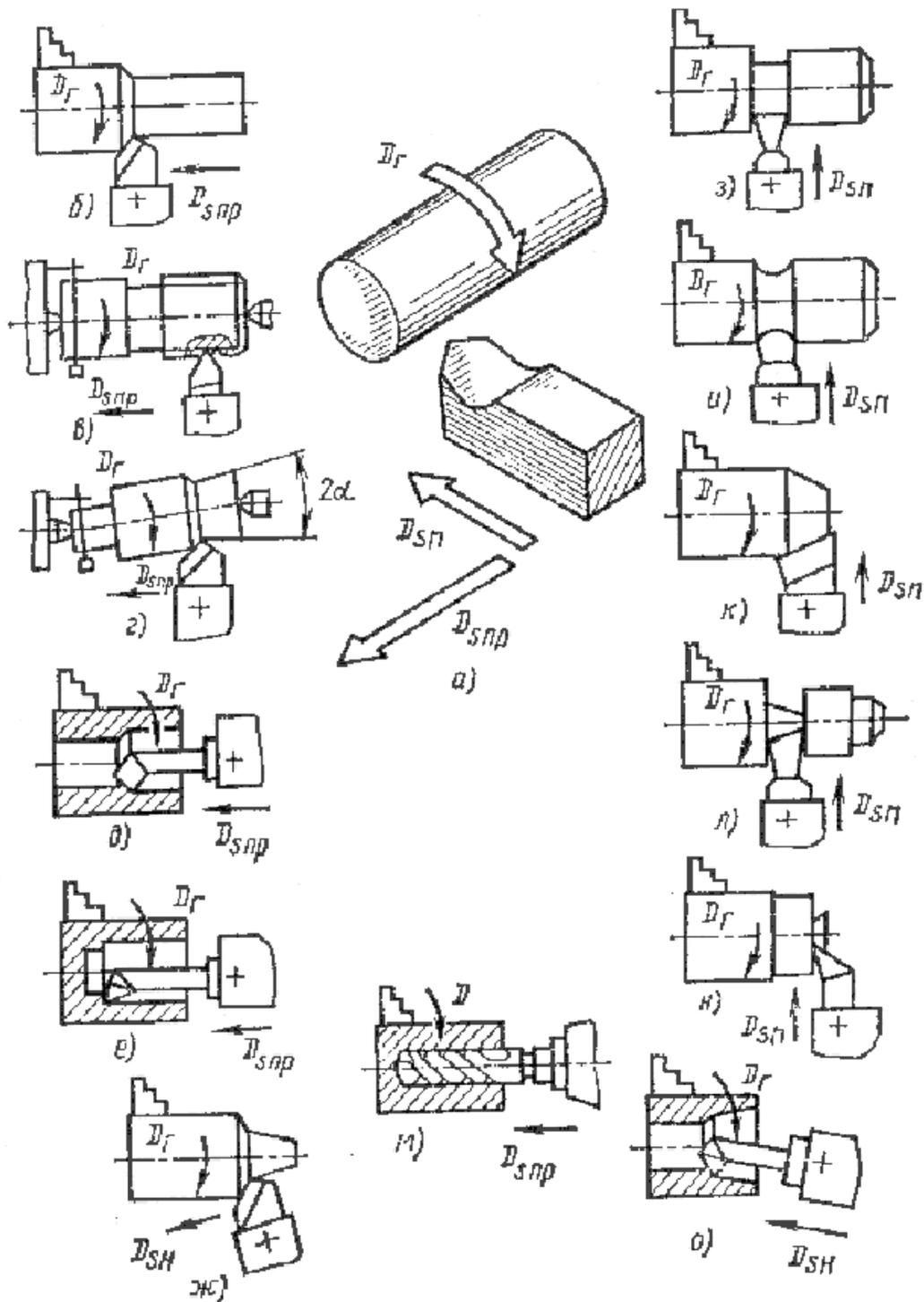


Рис. 4.13. Схема обработки заготовок на токарных станках

Наружные (рис. 4.13, в) и *внутренние резьбы* нарезают резьбовыми резцами.

Точение длинных пологих конусов выполняют, смещая в поперечном направлении корпус задней бабки относительно ее основания (рис. 4.13, г) или используя конусную линейку.

Сквозные *отверстия растачивают* проходными расточными резцами (рис. 4.13, д), глухие – упорными (рис. 4.13, е).

С поперечным движением подачи на токарных станках *протачивают кольцевые канавки* (рис. 4.13, з) прорезными резцами, *фасонные поверхности* (рис. 4.13, и) – фасонными резцами, *короткие конические поверхности – фаски* (рис. 4.13, к) – широкими резцами. *Отрезание деталей* от заготовки (рис. 4.13, л) выполняют отрезными резцами с наклонной режущей кромкой, что позволяет получить у готовой детали торец без остаточного заусенца. *Подрезание торцов* (рис. 4.13, н) выполняют подрезанными резцами.

Обработку отверстий производят сверлами, зенкерами, развертками (рис. 4.13, м). Обработку ведут с продольным движением подачи режущего инструмента. *Обтачивание наружных и растачивание внутренних конических поверхностей средней длины* (рис. 4.13, ж, о) производят с наклонным движением подачи, при повороте каретки верхнего суппорта.

4.5. Обработка заготовок на сверлильных и расточных станках

4.5.1. 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.

4.5.2. Типы сверлильных станков

Вертикально-сверлильные станки (рис. 4.14, 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. 4.14, б) используются для обработки отверстий в крупногабаритных заготовках. Эти станки универсальные их применяют в единичном и мелкосерийном производстве.

Вертикально-сверлильные (рис. 4.14, а) 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. 4.14, 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 подачи. 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 обрабатываемого отверстия.

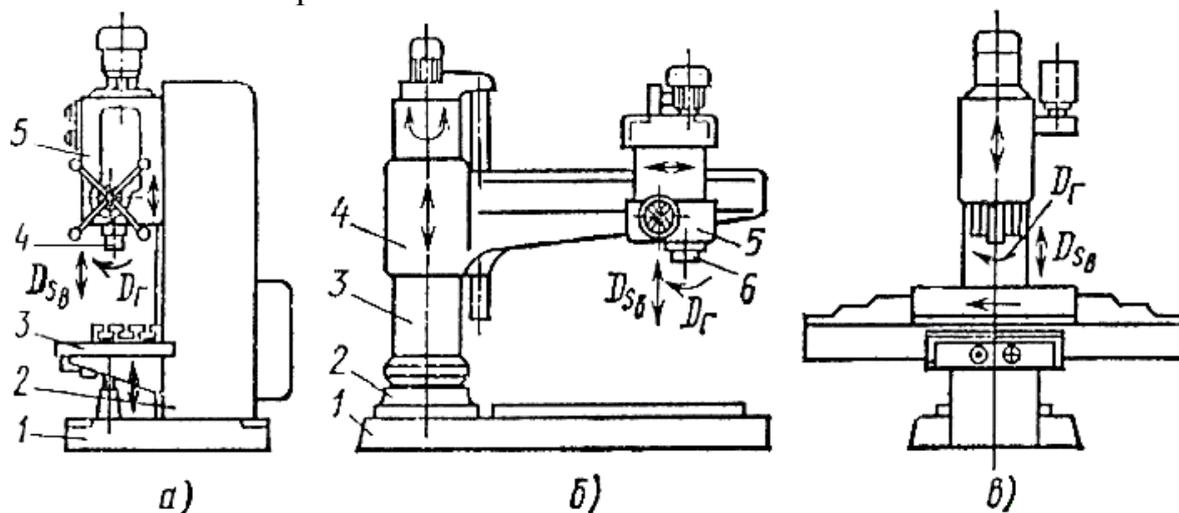


Рис. 4.14. Основные типы сверлильных станков

На неподвижной колонне 2 *радиально-сверлильного станка* (рис. 4.14, 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.

4.5.3. 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 l_1 , шейку l_2 , хвостовик l_3 и лапку l_4 . Хвостовик служит для закрепления сверла на станке, лапка предохраняет хвостовик при выбивании сверла из шпинделя станка. Рабочая часть имеет режущую l_5 и направляющую l_6 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.

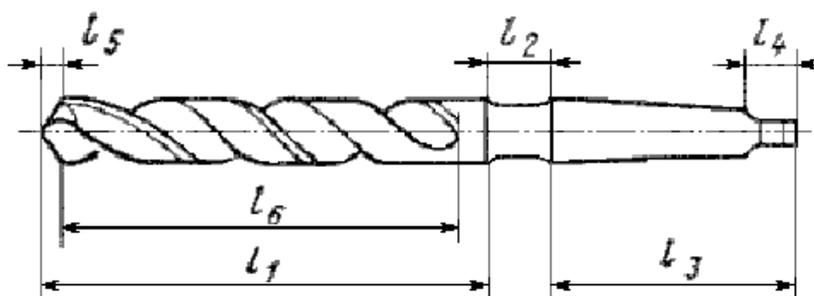


Рис. 4.15. Элементы спирального сверла с коническим хвостовиком

Зенкеры используют для обработки отверстий, полученных сверлением, литьем или ковкой. Зенкеры делят на цилиндрические (рис. 4.16, а) и конические. В отличие от сверл, зенкеры снабжены тремя или четырьмя главными режущими кромками и не имеют поперечной режущей кромки.

Зенковки (рис. 4.16, в) и *цековки* (рис. 4.16, б, г) – многолезвийные режущие инструменты для обработки конических, цилиндрических и торцовых входных участков отверстий.

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. 4.16, д, е) и конические, цельные с хвостовиком и насадные.

Комбинированный инструмент (рис. 4.16, ж) применяют для повышения производительности в крупносерийном и массовом производстве.

Метчики (рис. 4.16, з) предназначены для нарезания внутренней резьбы и представляют собой винт, на котором прорезаны прямые или винтовые канавки, в результате чего образуются режущие кромки.

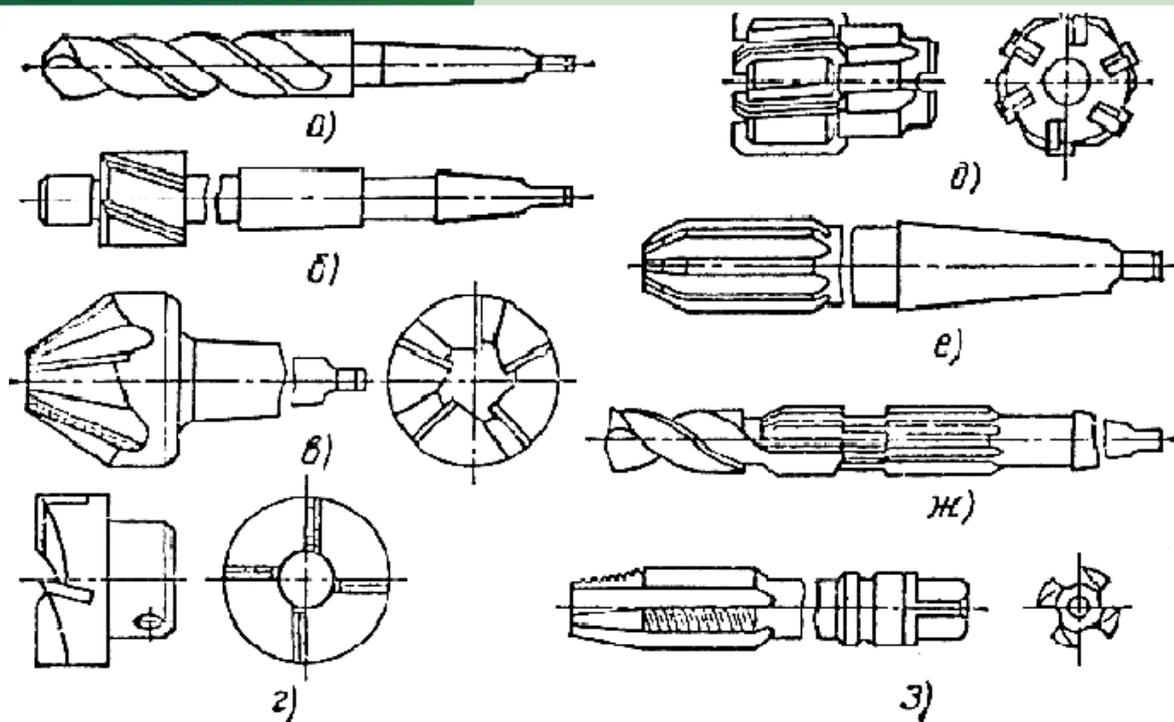


Рис. 4.16. Режущие инструменты, применяемые на сверлильных станках

Режущие инструменты закрепляют в шпинделе станка непосредственно с помощью конического хвостовика или с применением *переходных конических втулок*. Инструменты меньших диаметров с цилиндрическим хвостовиком закрепляют в различных по конструкции *патронах*.

На станках с инструментальными магазинами инструмент крепят в специальных 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 струбцинами, трехлачковые 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.

4.5.4. Основные виды работ, выполняемых на сверлильных станках

Схемы обработки заготовок приведены на рис. 4.17.

Сверлением (рис. 4.17, а) получают сквозные и глухие цилиндрические поверхности. *Рассверливание* спиральным сверлом (рис. 4.17, б) производят для увеличения диаметра отверстия. Диаметр отверстия под рассверливание выбирают так, чтобы поперечная режущая кромка в работе не участвовала.

Зенкерование (рис. 4.17, в) также применяют для увеличения диаметра отверстия. В отличие от рассверливания, зенкерование обеспечивает большую производительность и точность обработки.

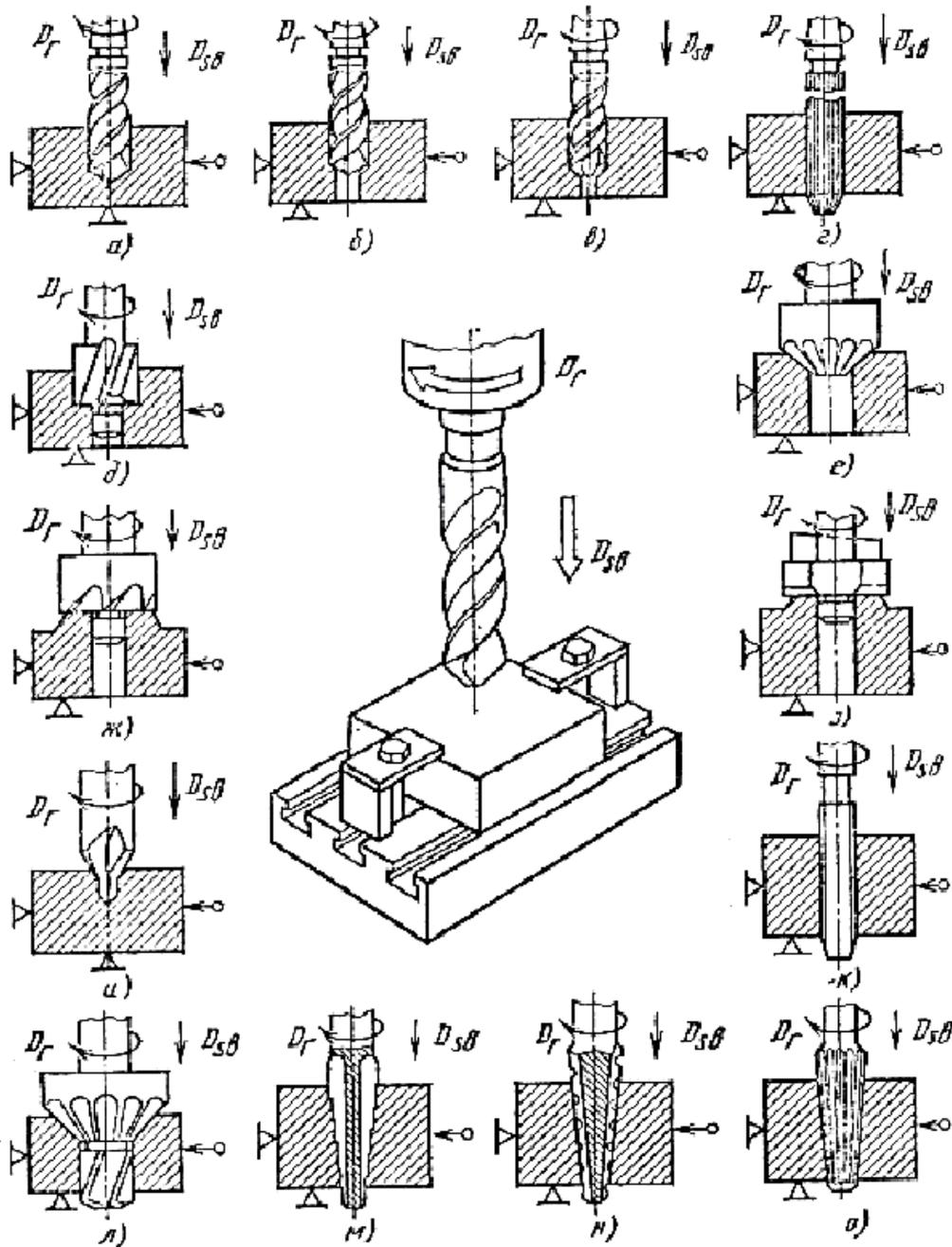


Рис. 4.17. Схемы обработки заготовок на сверлильных станках

Развертыванием (рис. 4.17, 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. 4.17, м), затем конической разверткой со стружкоразделительными канавками (рис. 4.17, н) и окончательно – конической разверткой с гладкими режущими кромками (рис. 4.17, о).

Зенкованием обрабатывают конические углубления под головки винтов и болтов (рис. 4.17, е). Некоторые зенковки имеют направляющую часть, которая обеспечивает соосность конического углубления и основного отверстия. *Цекованием* обрабатывают цилиндрические углубления (рис. 4.17, д) и торцовые плоскости (рис. 4.17, ж, з), которые являются опорными поверхностями головок болтов, винтов, гаек. Перпендикулярность торца по отношению к основному отверстию достигается наличием у цельной цековки (рис. 4.17, д, ж) и у пластинчатого резца (рис. 4.17, з) направляющей части. *Нарезание резьбы* производят метчиком (рис. 4.17, к). Комбинированным инструментом получают *сложные поверхности* (рис. 4.17, и, л).

4.5.5. 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.

Выпускаются следующие типы расточных станков: координатно-расточные, горизонтально-расточные и алмазно-расточные (рис. 4.18). *Координатно-расточные станки* (рис. 4.18, 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. 4.18, 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. 4.18, 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. 4.18, 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.

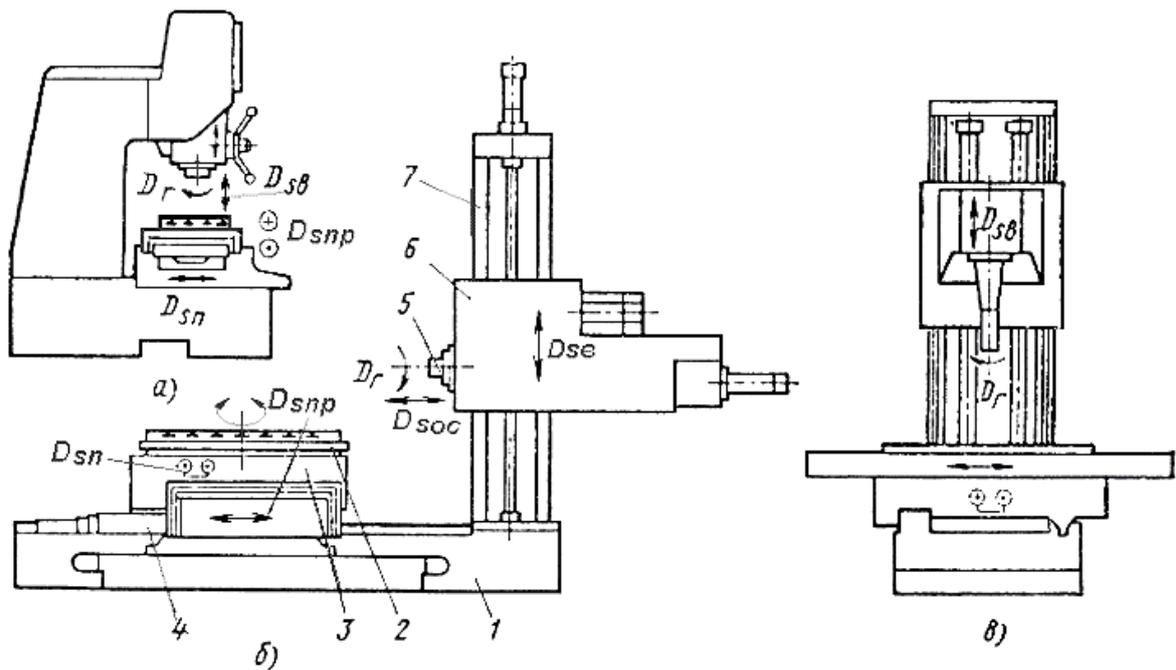


Рис. 4.18. Основные типы расточных станков

Вращательное главное движение D_r 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 $D_{сп}$ стола или поперечное перемещение D_{sn} салазок. Поворотный стол позволяет обрабатывать заготовку с разных сторон без переустановки ее на столе.

4.5.6. Режущий инструмент и схемы обработки заготовок на расточных станках

Наиболее широко на расточных станках используют расточные резцы (проходные, подрезные, канавочные, резьбовые), применяют также сверла, зенкеры, развертки, метчики, фрезы.

Наибольшее распространение имеет расточной инструмент, выполненный в виде *консольной расточной оправки* 1 с закрепленным в ней стержневым резцом 2 (рис. 4.19, а).

Установку резца на заданный диаметр отверстия выполняют регулированием его вылета. Настройка инструмента облегчается при использовании *резцов-вставок* с микрометрическим регулированием размера (рис. 4.19, б). *Расточными головками* называют расточные оправки, у которых резцы установлены на диаметрально противоположных сторонах (рис. 4.19, в, г). Для подрезки применяют резцы, режущая часть которых выполнена с углом в плане $\gamma=90^\circ$ (рис. 4.19, г).

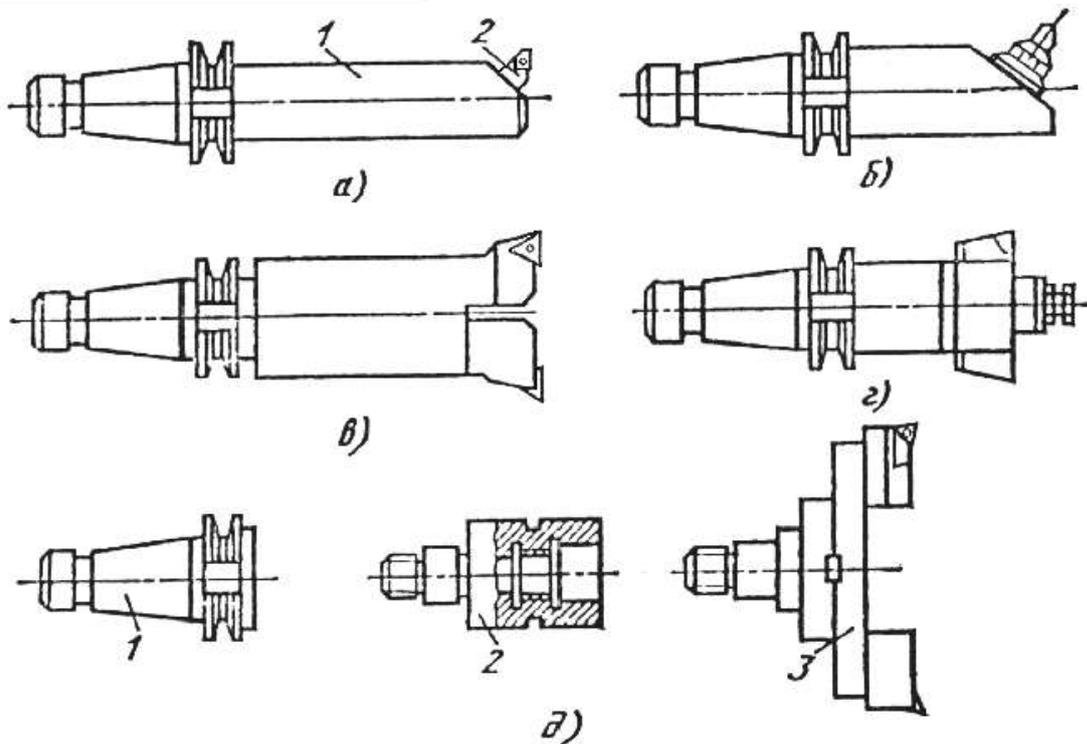


Рис. 4.19. Режущие инструменты, применяемые на расточных станках

На станках с ЧПУ обычно применяют *сборный расточной инструмент*, который включает в себя унифицированный хвостовик 1 (рис. 4.19, д), удлинительный элемент 2 и головку 3.

Растачивание цилиндрических отверстий производят расточными проходными резцами (рис. 4.20, а). *Подрезание торцов* небольших размеров выполняют инструментом для подрезных работ (рис. 4.20, б). *Внутренние цилиндрические поверхности очень большого диаметра* растачивают расточным резцом, установленным на планшайбе станка в оправке (рис. 4.20, в). Главное движение совершает инструмент, вращающийся вместе с планшайбой. Аналогичным образом обрабатывают *короткие наружные цилиндрические поверхности* (рис. 4.20, 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 высокую точность и жесткость, растачивание на таких станках обеспечивает высокое качество поверхности.

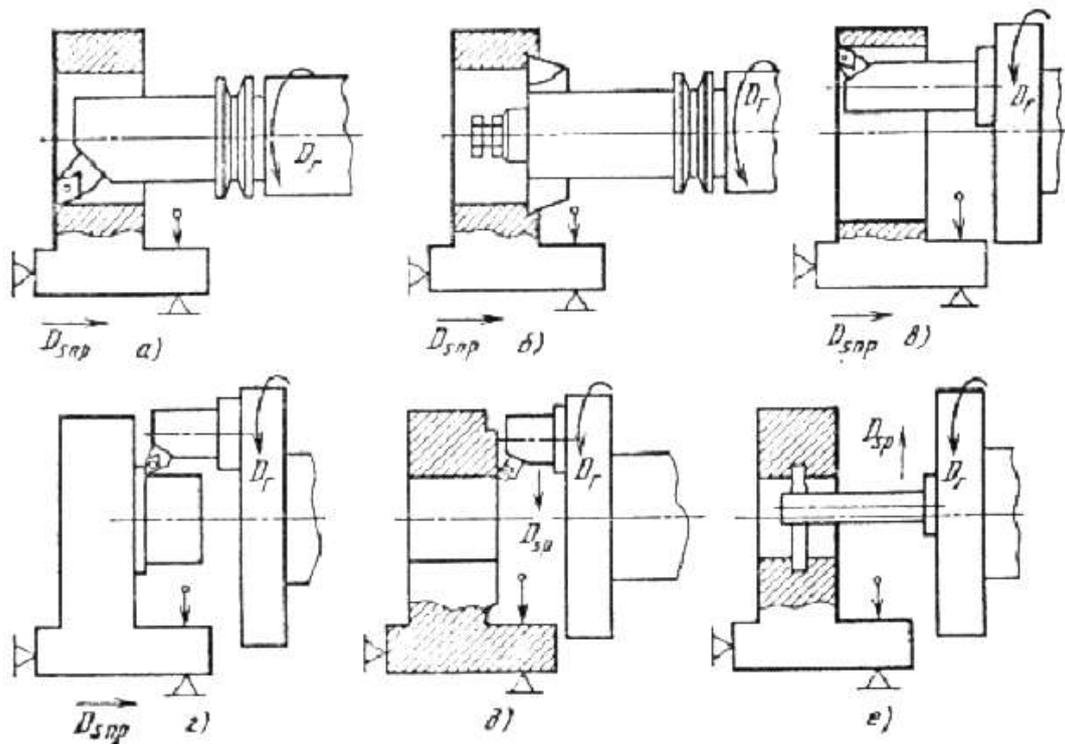


Рис. 4.20. Схемы обработки заготовок на расточных станках

4.6. Обработка заготовок на шлифовальных станках

4.6.1. 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 поверхност-

ного 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.

4.6.2. Основные типы шлифовальных станков

Наиболее распространенными шлифовальными станками являются круглошлифовальные, внутришлифовальные, плоскошлифовальные, бесцентровошлифовальные, заточные, а также специализированные станки.

Круглошлифовальные станки (рис. 4.21, а) имеют поворотную переднюю 3, шлифовальную 4 и заднюю 5 бабки.

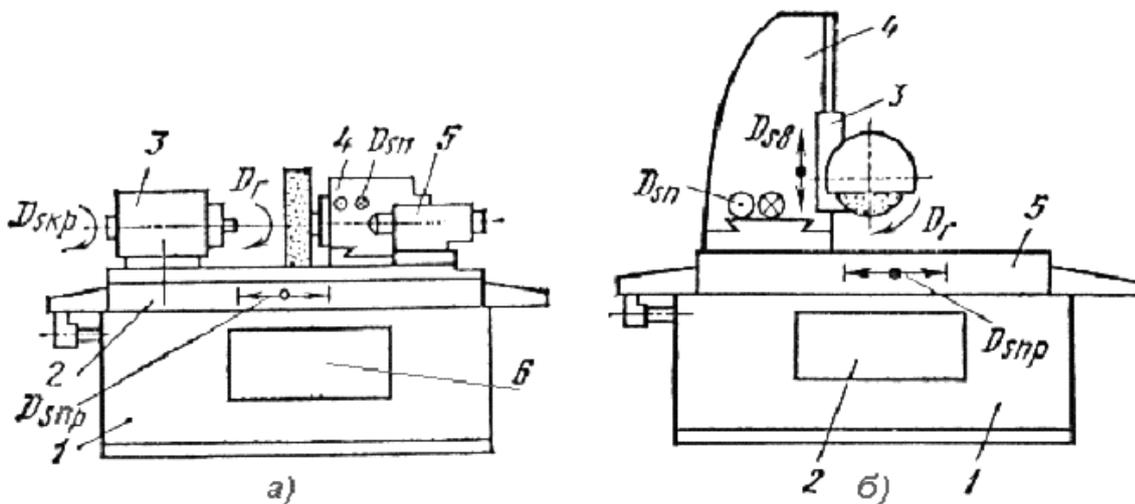


Рис. 4.21. Шлифовальные станки

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. 4.21, 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 специ-

альными устройствами для правки круга после его износа, а также приспособлениями для балансировки (уравновешивания) круга.

4.6.3. 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.

4.6.4. Схемы обработки

На круглошлифовальных станках наиболее распространены методы шлифования в центрах. **Круглое шлифование** (рис. 4.22) выполняется при вращательном главном движении резания шлифовального круга и круговом движении подачи заготовки.

При *шлифовании с продольным движением подачи* (рис. 4.22, 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. 4.22, 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. 4.22, в) позволяет за один рабочий ход снять слой металла на всю необходимую глубину. Шлифовальный круг имеет конический участок длиной 8–12 мм, который удаляет основную часть срезаемого слоя, а цилиндрический участок зачищает обработанную поверхность.

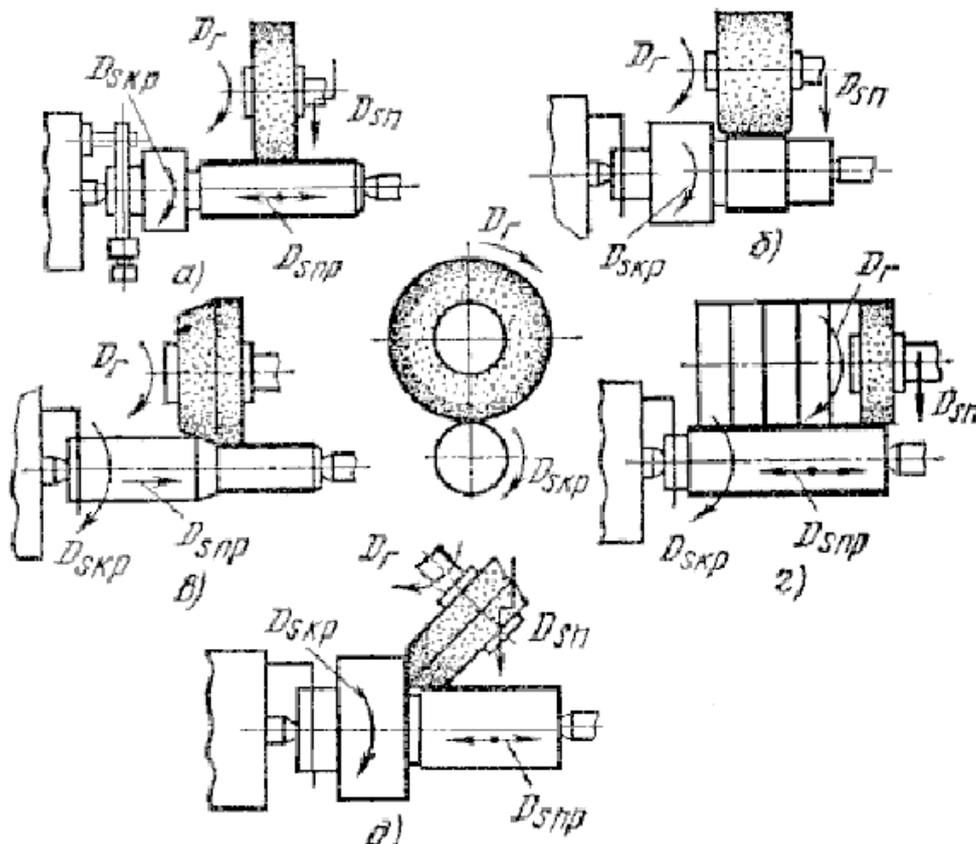


Рис. 4.22. Схемы круглого шлифования

При *шлифовании уступами* (рис. 4.22, 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.

Для *одновременной обработки цилиндрических и плоских (торцовых) поверхностей* шлифовальный круг заправляют специальным образом и поворачивают на определенный угол (рис. 4.22, д). Шлифование производят коническими участками круга.

Внутреннее шлифование выполняют двумя методами (рис. 4.23). При *шлифовании с продольным движением подачи* (рис. 4.23, а) заготовки закрепляют в трехкулачковом патроне. Отверстия шлифуют на всю их длину либо часть длины, когда необходимо обрабатывать лишь определенные участки.

На внутришлифовальных станках обрабатывают также внутренние торцовые, фасонные и конические поверхности.

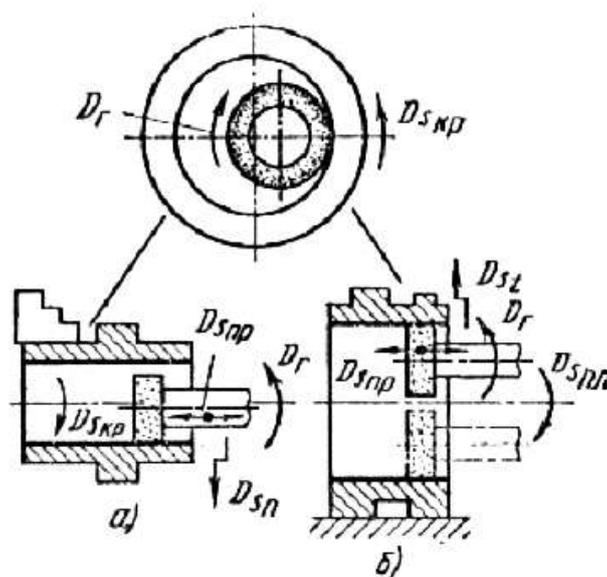


Рис. 4.23. Схемы внутреннего шлифования

Планетарное шлифование (рис. 4.23, 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. 4.24) 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. 4.24, в, г) более производительно, так как одновременно в работе участвует большее число абразивных зерен, однако *шлифование периферией круга* (рис. 4.24, а, б) позволяет выполнить большее число разнообразных работ.

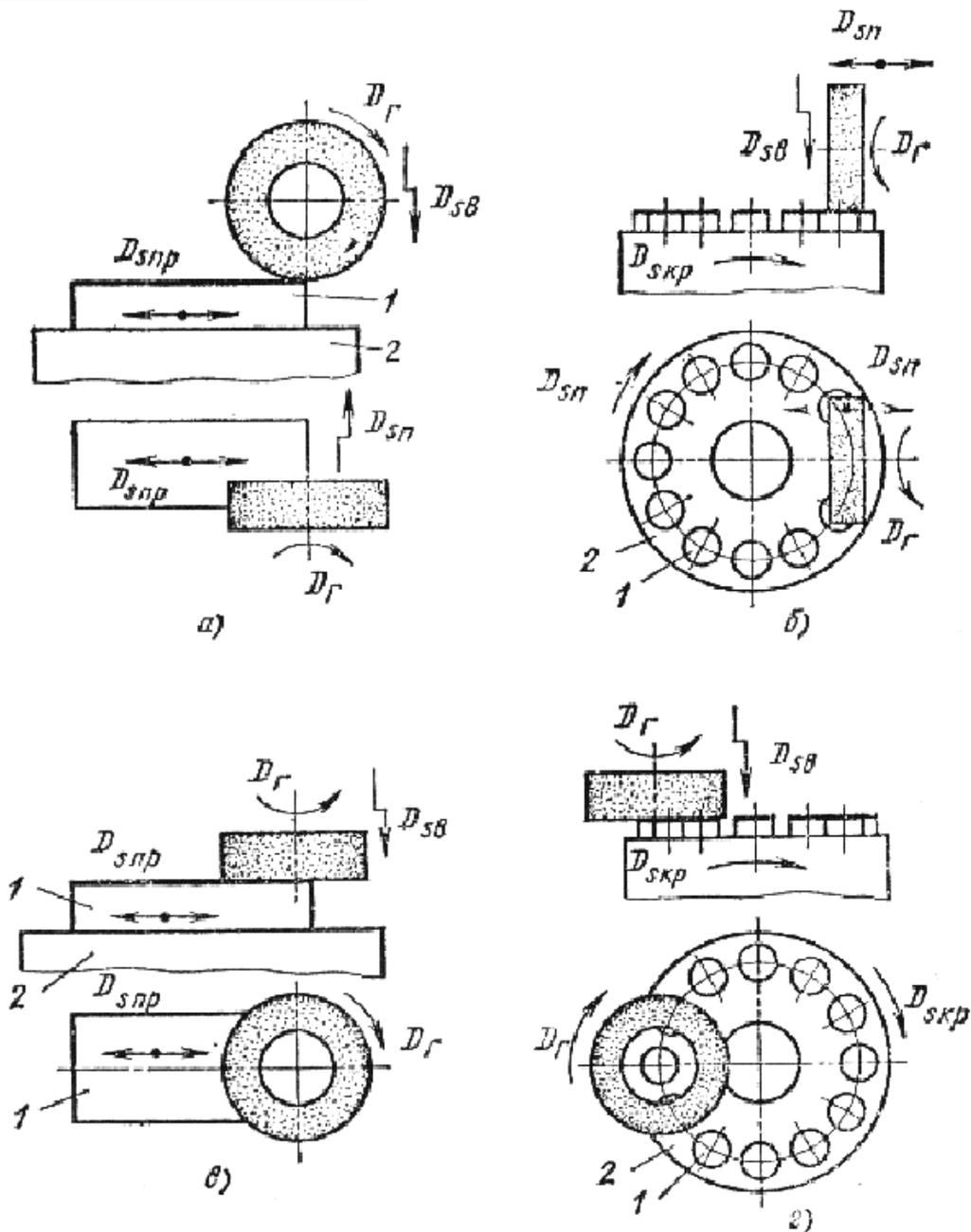


Рис. 4.24. Схемы плоского шлифования

При **бесцентровом шлифовании** (рис. 4.25) 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. 4.25, а).

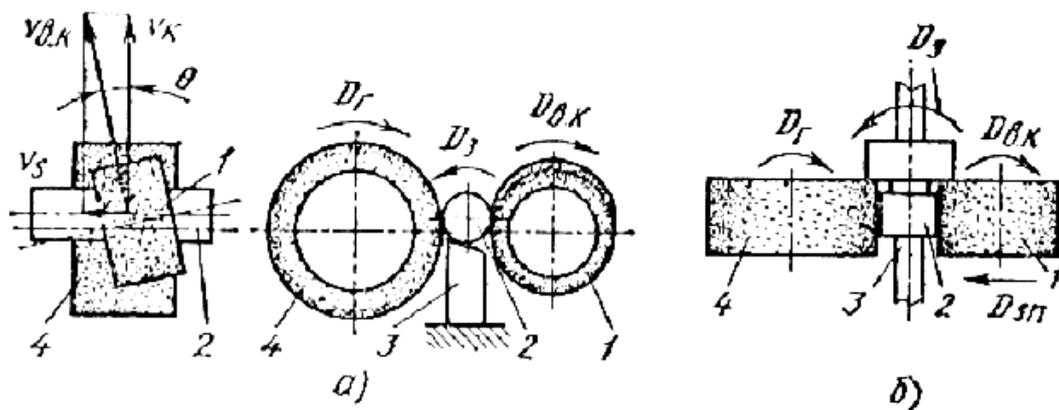


Рис. 4.25. Схема бесцентрового шлифования

При шлифовании заготовок с уступами (рис. 4.25, б) бабку ведущего круга не поворачивают, а перемещают по направляющим станины до определенного положения, т. е. используют метод врезания.

4.6.5. 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.

4.6.6. Полирование

Полирование применяют для получения высокой точности и зеркального блеска ответственных частей деталей, например, дорожек качения под-

шипников. Обработку заготовки 1 производят полировальными пастами, которые наносятся на быстровращающиеся эластичные круги или колеблющиеся щетки 2 (рис. 4.26, а, б). Хорошие результаты дает полирование быстро движущимися бесконечными абразивными лентами (шкурками) (рис. 4.26, в). Эластичная лента огибает всю шлифуемую поверхность, поэтому движения подачи могут отсутствовать.

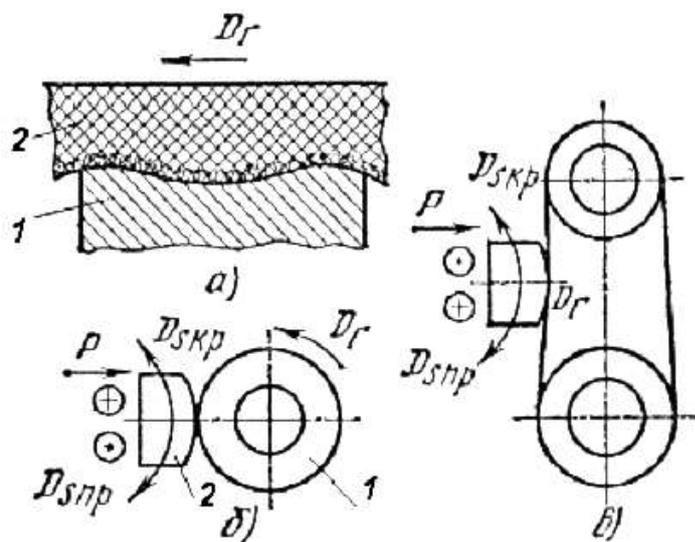


Рис. 4.26. Схемы полирования поверхностей

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. 4.26, б) и совершает движения подачи $D_{спр}$ и $D_{скр}$ в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности.

В процессе полирования не исправляются погрешности формы, а также местные дефекты предыдущей обработки.

4.6.7. 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. 4.27, 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. 4.27, б).

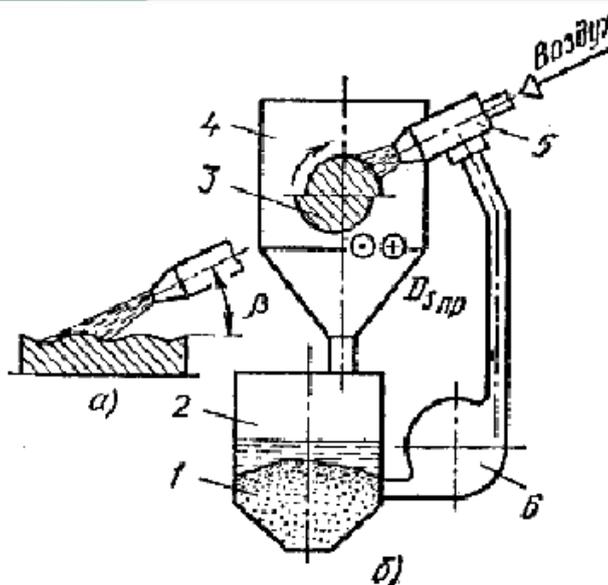


Рис. 4.27. Схема абразивно-жидкостной отделки

Абразивная суспензия 1, помещенная 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.

4.6.8. 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. 4.28, 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.

Притир или заготовка должны совершать разнонаправленные движения. Наилучшие результаты дает процесс, в ходе которого траектории движения каждого зерна не повторяются.

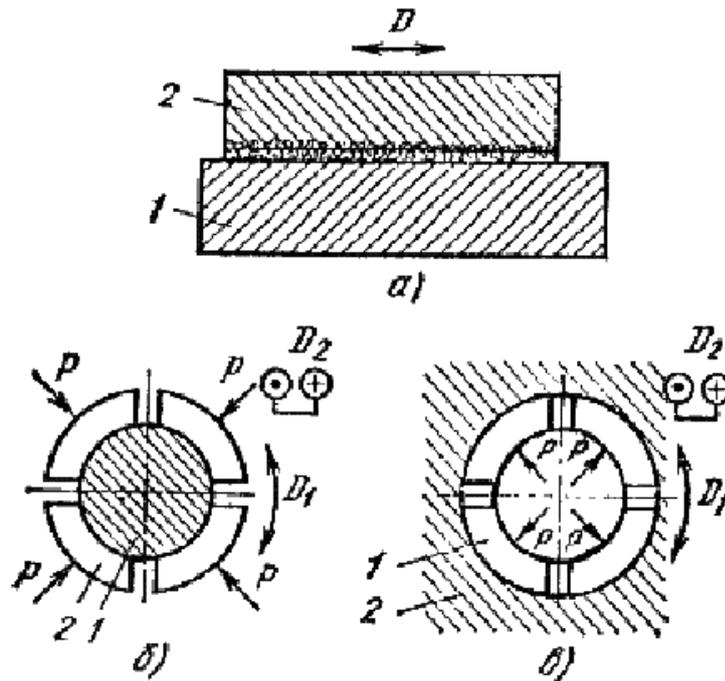


Рис. 4.28. Схемы притирки

Для *обработки наружной цилиндрической поверхности* (рис. 4.28, 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 D_2 . Аналогичные движения выполняются при *притирке отверстий* (рис. 4.28, в), однако притир должен равномерно разжиматься под действием силы P . Приведенные схемы притирки осуществляются на притирочных станках.

4.6.9. 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. 4.29, 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 .

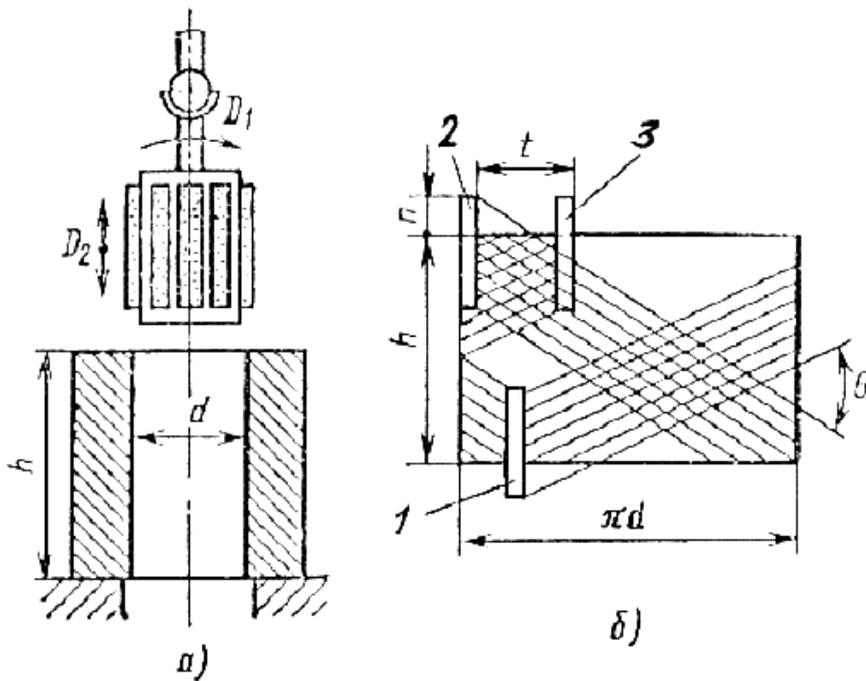


Рис. 4.29. Схема хонингования

Крайнее нижнее 1 и верхнее 2 положения абразивных брусков (рис. 4.29, б), указанные на развертке внутренней цилиндрической поверхности, устанавливают так, что создается перебег α . Перебег 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.

4.6.10. 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.

При обработке цилиндрической поверхности (рис. 4.30, а) сетка микронеровностей создается сочетанием вращательного движения D_1 заготовки, возвратно-поступательного ее перемещения $D_{сп}$ и колебательного движения D_2 брусков вдоль оси заготовки. Движение D_2 ускоряет сьем металла и улучшает однородность поверхности.

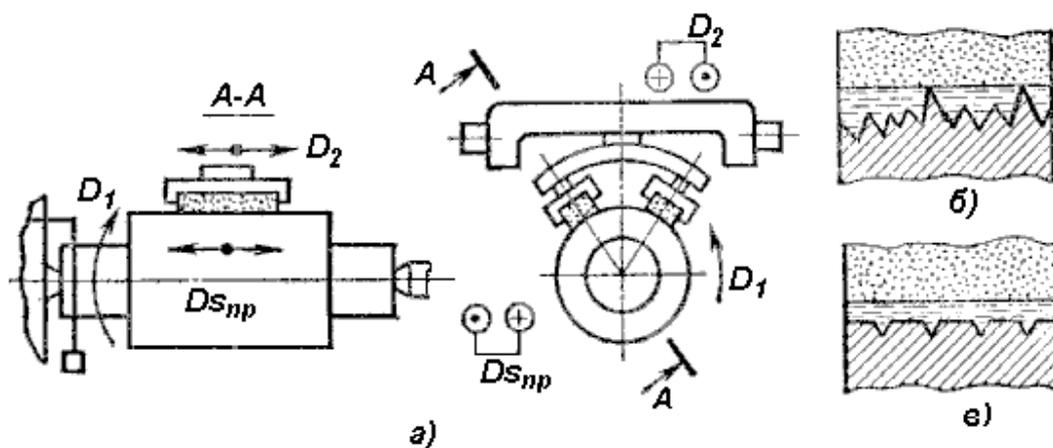


Рис. 4.30. Схема суперфиниширования

Важную роль играет смазочно-охлаждающая жидкость. Масляная пленка покрывает обрабатываемую поверхность, но наиболее крупные выступы (рис. 4.30, б) прорывают ее и в первую очередь срезаются бруском. По мере обработки давление бруска снижается, так как все больше число выступов прорывает масляную пленку, и, наконец, наступает такой момент (рис. 4.30, 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.).

4.7. Обработка заготовок на фрезерных станках

4.7.1. 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 барабанно-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.

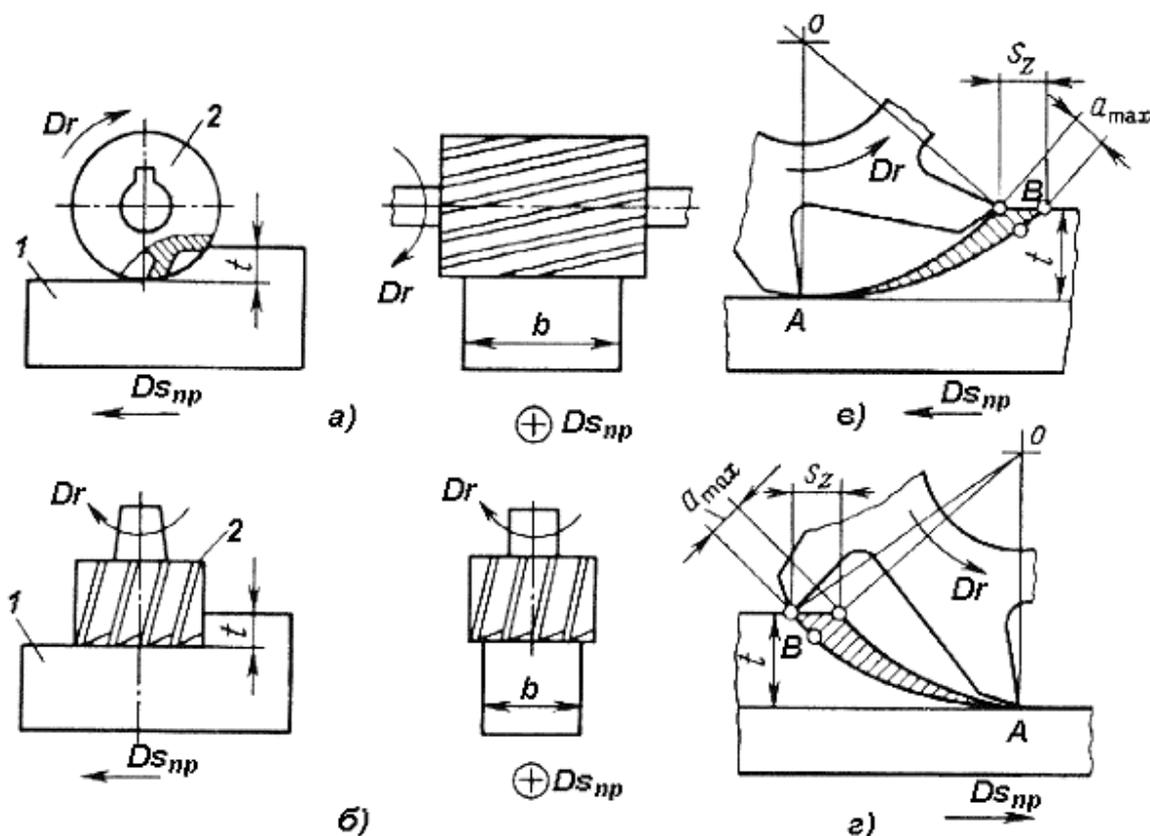


Рис. 4.31. Схемы фрезерования торцевой и цилиндрической фрезами

Цилиндрическое (рис. 4.31, а) и *торцовое* (рис. 4.31, б) фрезерование, в зависимости 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. 4.31, в); 2) по движению подачи (*попутное фрезерование*), когда направление движения подачи и главного движения резания совпадают (рис. 4.31, 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 a_{\max} 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.

4.7.2. Типы фрезерных станков

Горизонтально- (рис. 4.32, а) и *вертикально-фрезерные* (рис. 4.32, 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. 4.32, 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 $D_{s_{\text{пр}}}$, с салазками 6 - поперечное $D_{s_{\text{п}}}$ и с консолью 7 - вертикальное $D_{s_{\text{в}}}$ движения подачи.

Универсальный вертикально-фрезерный станок с ЧПУ (рис. 4.32, 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. 4.32, 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 стойках 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. 4.32, 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 $D_{скр}$).

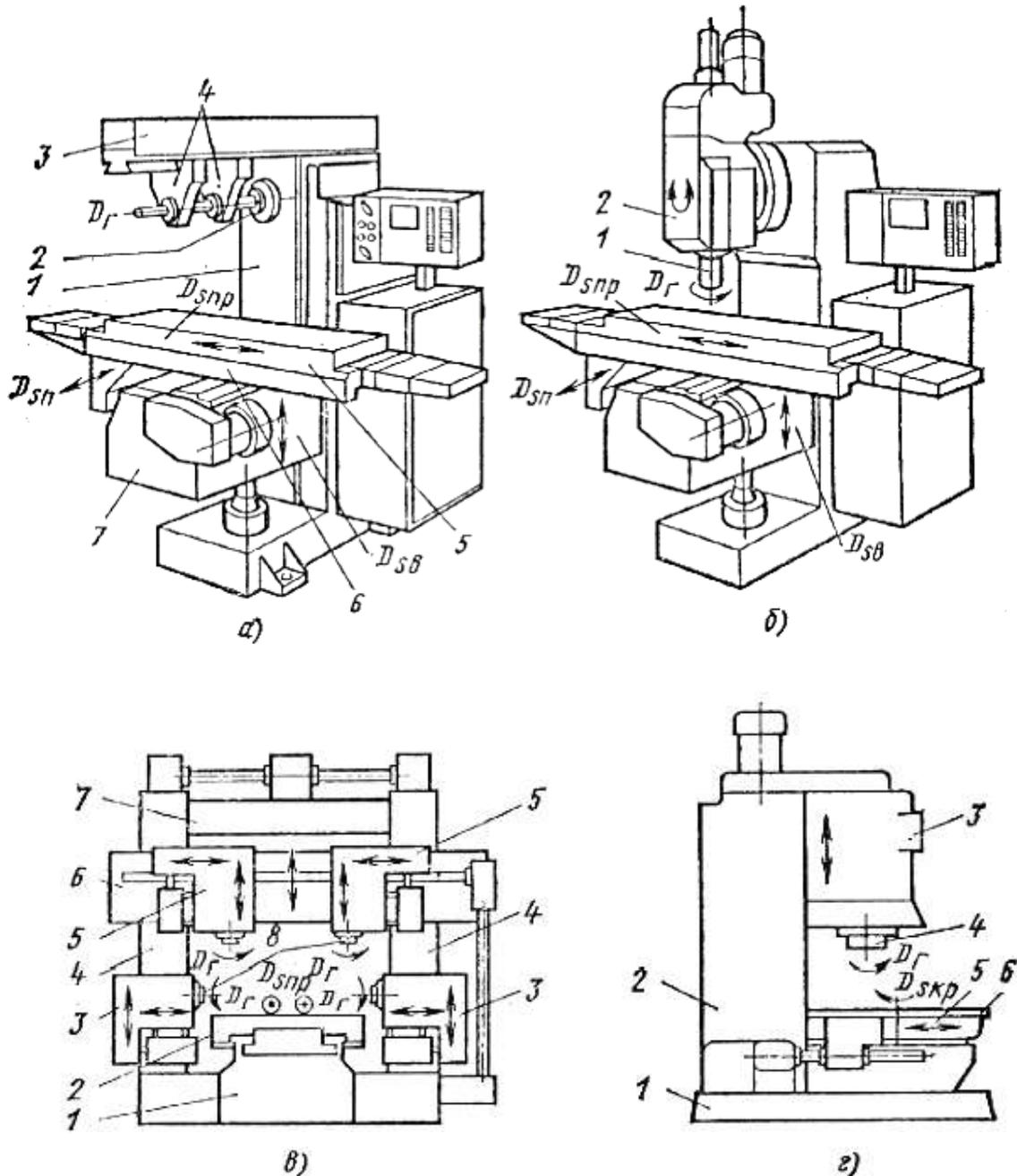


Рис. 4.32. Основные типы фрезерных станков

4.7.3. Режущий инструмент и технологическая оснастка фрезерных станков

При фрезеровании применяют фрезы различных типов: цилиндрические (рис. 4.33, а), торцовые (рис. 4.33, б, в) дисковые (рис. 4.33, в), концевые (рис. 4.33, г), угловые (рис. 4.33, д), шпоночные (рис. 4.33, е), фасонные (рис. 4.33, ж).

Фрезы бывают цельными или сборными. Режущие кромки могут быть прямыми или винтовыми, а зубья - остроконечными (рис. 4.33, и) или затупленными (рис. 4.33, 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.

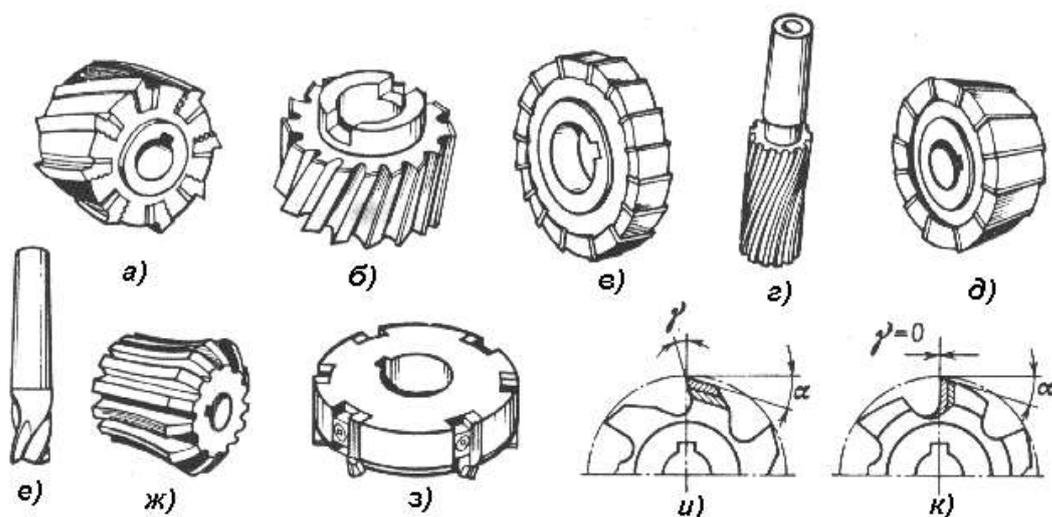


Рис. 4.33. Типы фрез

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.

4.7.4. Схемы обработки заготовок на фрезерных станках

Вертикальные плоскости на горизонтально-фрезерном станке (рис. 4.34, а) фрезеруют торцовыми насадными фрезами, на вертикально-фрезерном (рис. 4.34, г) - концевыми фрезами. *Горизонтальные плоскости* обрабатывают цилиндрическими фрезами на горизонтально-фрезерном станке (рис. 4.34, б) и торцовыми насадными фрезами - на вертикально-фрезерном станке (рис. 4.34, в). *Наклонные плоскости небольшой ширины* получают на горизонтально-фрезерном станке одноугловой фрезой (рис. 4.34, д). *Широкие наклонные плоскости* обрабатывают на вертикально-фрезерном станке с поворотом шпиндельной головки (рис. 4.34, е) торцовой насадкой или концевой фрезами. *Уступы и прямоугольные пазы* на горизонтально-фрезерном станке обрабатывают соответственно дисковыми двусторонними (рис. 4.34, ж) и трехсторонними (рис. 4.34, и) фрезами, а на вертикально-фрезерном - концевыми (рис. 4.34, з, к) фрезами.

Фасонные поверхности с криволинейной образующей и прямолинейной направляющей обрабатывают фасонными фрезами на горизонтально-фрезерном станке (рис. 4.34, л). *Пазы типа “ласточкин хвост” и Т-образные* обрабатывают на вертикально-фрезерных станках. Сначала фрезеруют прямоугольный паз концевой фрезой, а затем концевой одноугловой (рис. 4.34, м) фрезой или фрезой для Т-образных пазов (рис. 4.34, р). На горизонтально-фрезерном станке *шпоночные пазы* фрезеруют дисковыми фрезами (рис. 4.34, о), а на вертикально-фрезерном - концевыми (рис. 4.34, п). *Одновременную обработку нескольких поверхностей* на горизонтально-фрезерном станке производят набором фрез (рис. 4.34, н).

Те же работы выполняются и на других типах фрезерных станков.

4.8. Обработка заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках

4.8.1. 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_1 сообщается столу с заготовкой, а движение подачи - суппорту с резцом.

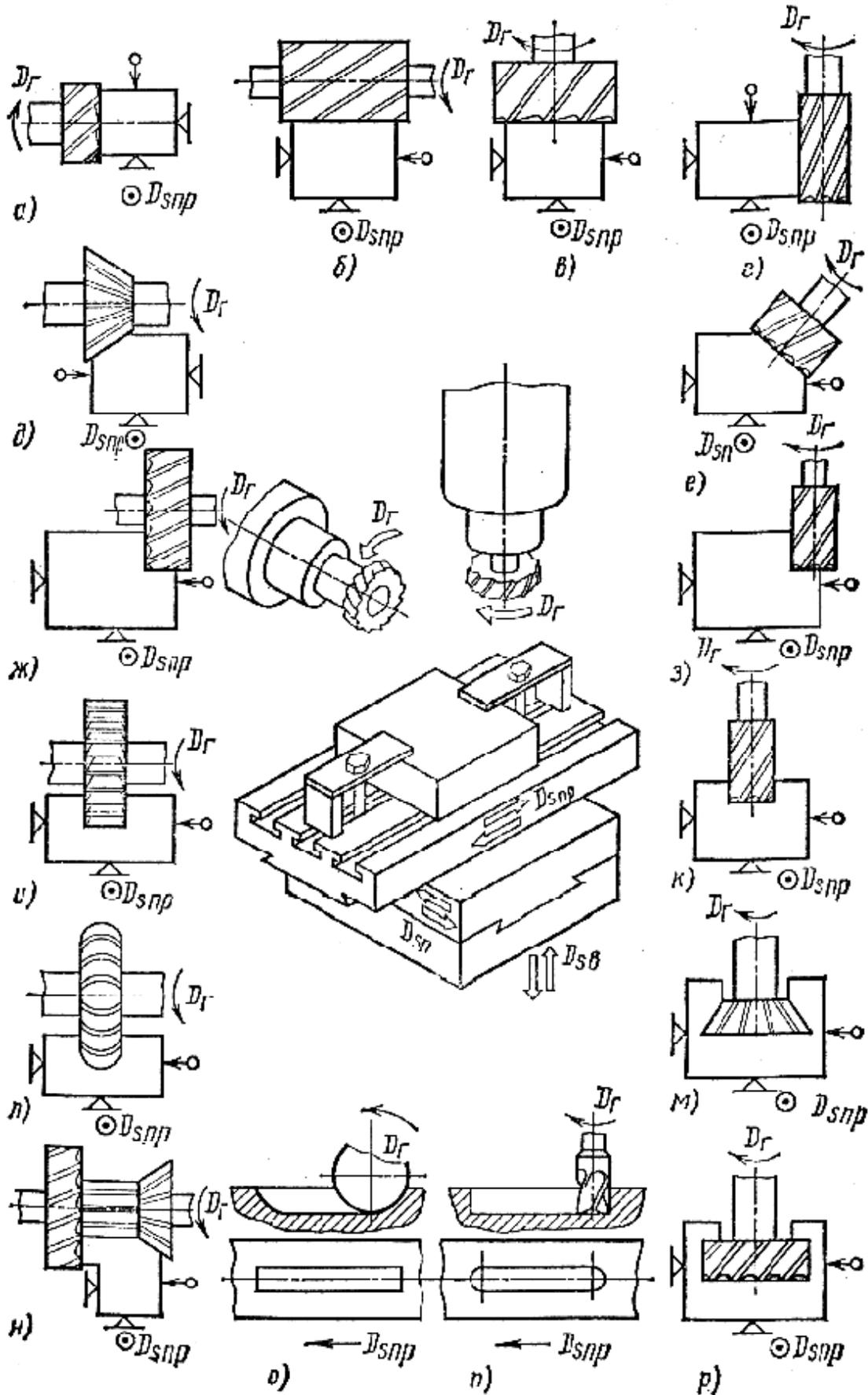


Рис. 4.34. Схемы обработки заготовок на фрезерных станках

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.

4.8.2. Строгальные, долбежные и протяжные станки

Поперечно-строгальный станок (рис. 4.35, а) состоит из основания 1, станины 2, траверсы 3, которая двигается по вертикальным направляющим станины, и стола 4, установленного на траверсе. По направляющим станины перемещается ползун 7. Резец закрепляется в откидном резцедержателе 5, смонтированном на вертикальном суппорте 6. Движение подачи совершается во время холостых ходов ползуна.

Продольно-строгальные станки (рис. 4.35, б) бывают одно- и двух-стоечные. Станина 1 снабжена направляющими, по ним стол 2 совершает возвратно-поступательное главное движение резания, которое задается 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. 4.35, 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. 4.35, 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.

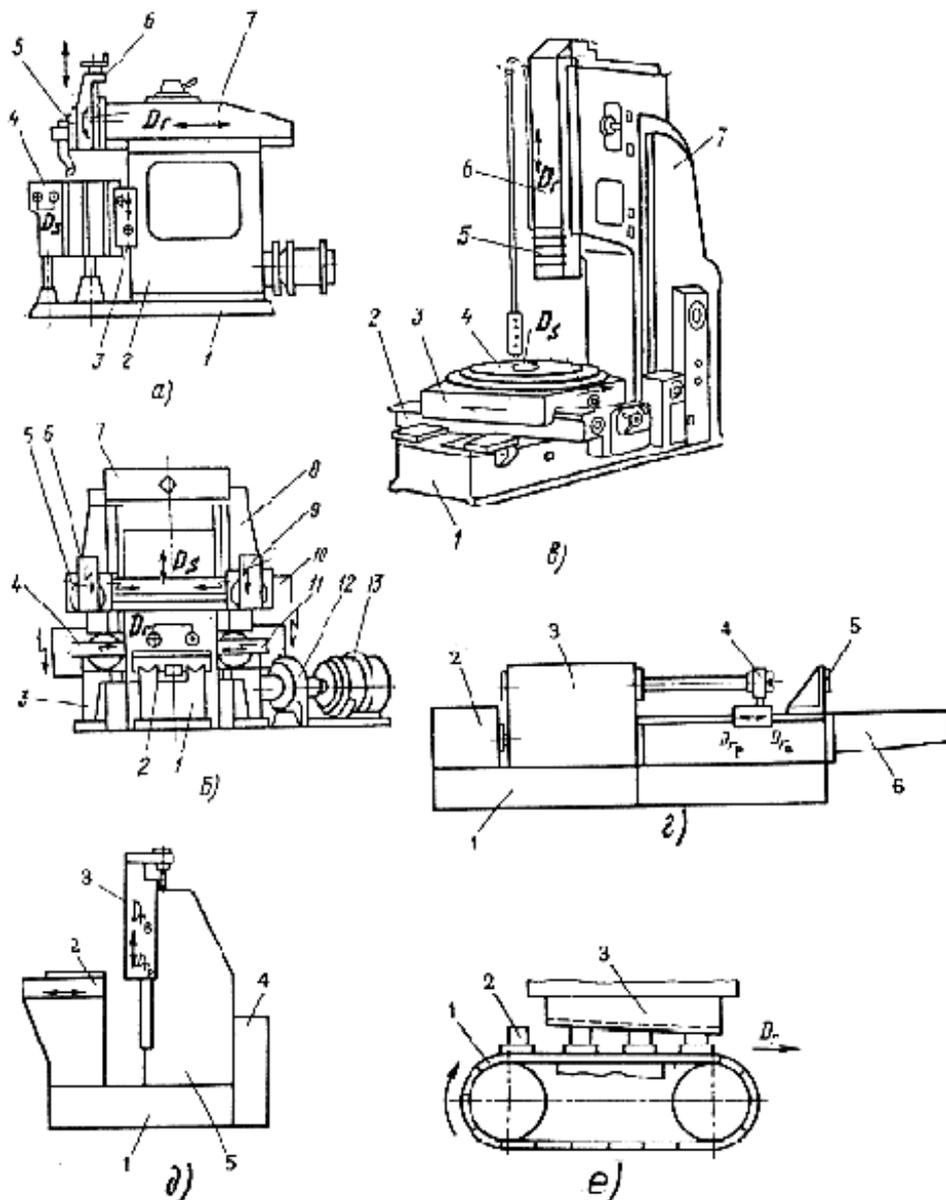


Рис. 4.35. Стругальные, долбежные и протяжные станки

Вертикально-протяжной станок для наружного протягивания (рис. 4.35, 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. 4.35, 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.

4.8.3. Режущий инструмент для строгания, долбления и протягивания

В зависимости от назначения различают следующие типы **строгальных резцов** (рис. 4.36): *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. 4.36, а), которая позволяет при изгибе из-за перегрузки обеспечить отвод режущей кромки от заготовки.

Долбежные резцы выполняют трех основных типов (рис. 4.36): *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.

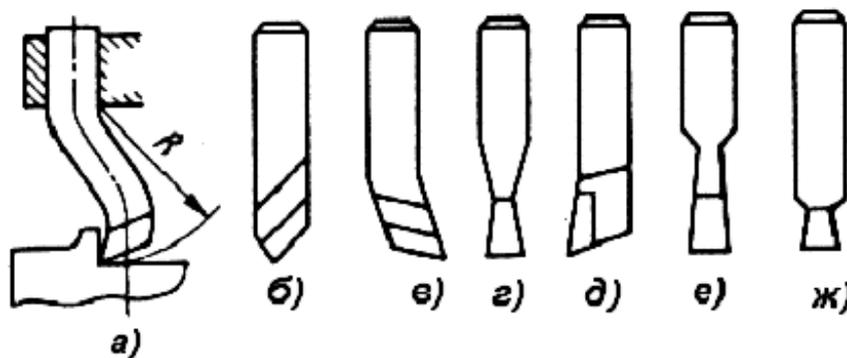


Рис. 4.36. Строгальные и долбежные резцы

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 l_1 (рис. 4.37, а) служит для закрепления протяжки в патроне каретки. Шейка l_2 облегчает подачу протяжки к рабочему патрону через отверстие в заготовке. Передняя направляющая часть l_3 служит для центрирования заготовки относительно оси протяжки. Ее диаметр соответствует диаметру отверстия в заготовке. На режущей части l_4 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. 4.37, в) и без них (рис. 4.37, г). Это облегчает стружкообразование и увеличивает стойкость инструмента.

Калибрующая часть l_5 придает обрабатываемой поверхности окончательный размер и шероховатость. Задняя направляющая часть l_6 служит для центрирования заготовки относительно протяжки до выхода из отверстия последнего зуба, что исключает перекос и поломку зубьев. Задняя замковая часть l_7 предусматривается в тех случаях, когда протяжка закрепляется в патроне вспомогательной каретки.

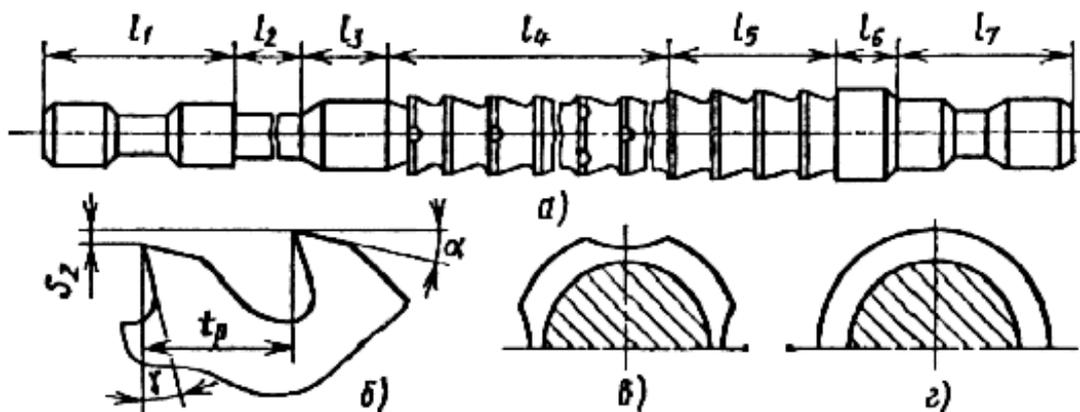


Рис. 4.37. Элементы круглой протяжки

Передний γ и задний α углы (рис. 4.37, б) измеряют в плоскости, перпендикулярной режущей кромке.

4.8.4. 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. 4.38, аI), 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. 4.38, аII), или на долбежных станках (рис. 4.38, б). Стругание *пазов и канавок* (рис. 4.38, 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.

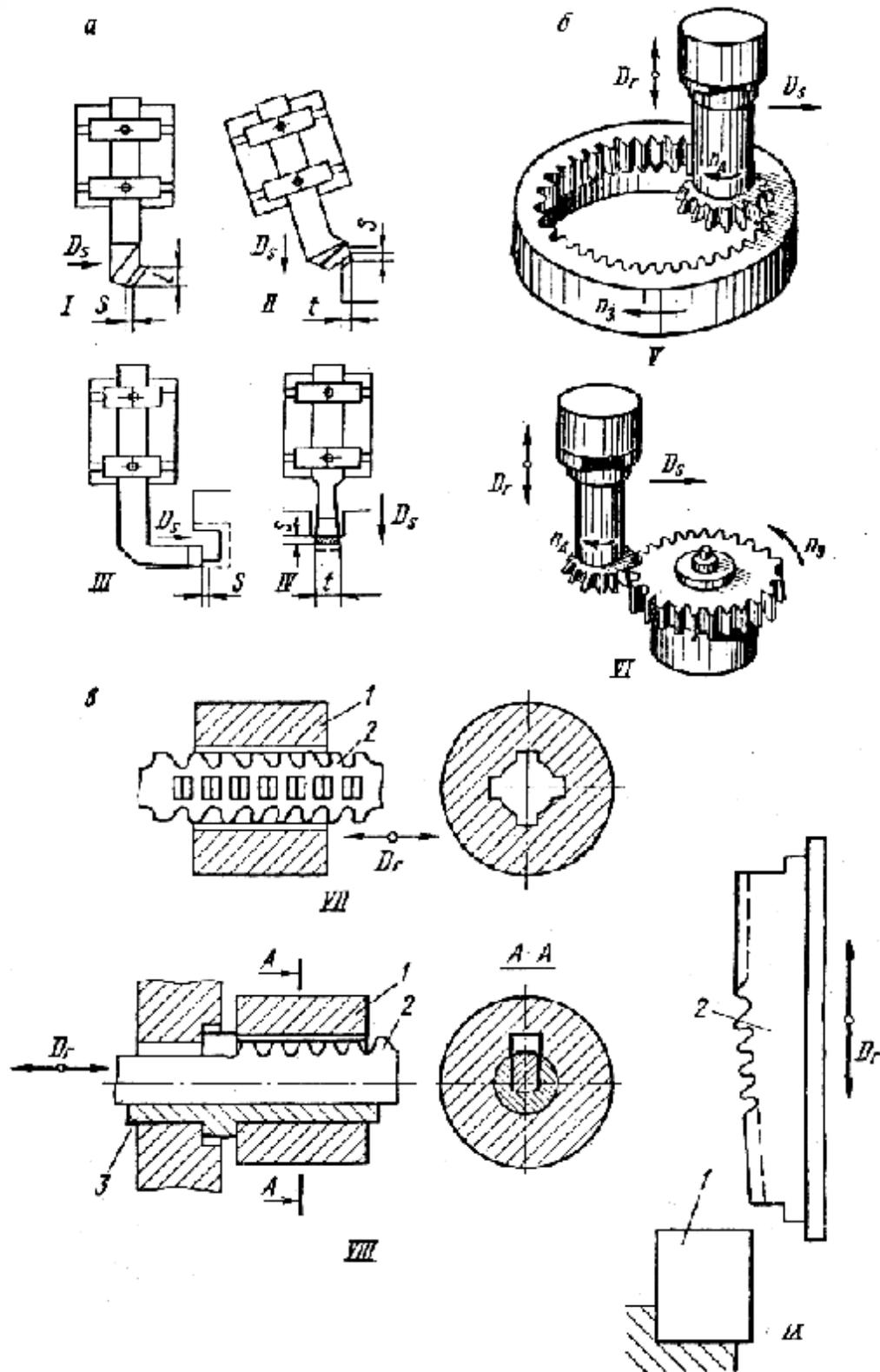


Рис. 4.38. Схемы строгания, долбления и протягивания

Долбление широко применяют для нарезания цилиндрических зубчатых колес зуборезным долбяком (рис. 4.38, 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_z в период холостого хода долбяка.

Протяжные работы применяют после сверления, растачивания, зенкования, а также штамповки для чистовой обработки внутренних и наружных поверхностей.

Цилиндрические отверстия протягивают круглыми протяжками, а *шлицевые* (рис. 4.38, в VII) - фасонными многошлицевыми протяжками, воспроизводящими требуемую форму поверхностей. *Шпоночные пазы* протягивают плоскими шпоночными протяжками (рис. 4.38, в VIII) с направляющей втулкой.

На вертикально-протяжных станках протягивают плоские и фасонные поверхности (рис. 4.38, в IX) протяжками соответствующей формы.

4.9. Обработка заготовок на электрофизических и электрохимических станках

4.9.1. Характеристика электрофизических и электрохимических методов обработки

Электрофизические и электрохимические (ЭФЭХ) методы обработки предназначены для обработки заготовок из очень прочных, вязких, хрупких и неметаллических материалов. ЭФЭХ методы в ряде случаев имеют очень существенные преимущества перед обработкой резанием. При использовании этих методов отсутствует силовое воздействие инструмента на заготовку, не возникает наклеп обработанной поверхности, дефектный слой незначителен, удаляются прижоги поверхности, полученные при шлифовании, повышаются антикоррозионные, прочностные и другие эксплуатационные характеристики деталей.

ЭФЭХ методы обработки универсальны и обеспечивают непрерывность процессов при одновременном формообразовании всей обрабатываемой поверхности, что позволяет обрабатывать очень сложные наружные и внутренние поверхности заготовок.

4.9.2. Электроэрозионные методы обработки

Электроэрозионные методы основаны на явлении *эрозии* (разрушения) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока. Разряд между электродами происходит в диэлектрической жидкой или газовой среде. В жидкой среде процесс эрозии более интенсивен. Когда разность потенциалов на электродах достигает определенной величины, происходит пробой диэлектрического промежутка в виде искрового или дугового разряда. При высокой концентрации энергии мгновенная плотность тока в канале проводимости достигает значительных

величин, и температура на поверхности заготовки электрода возрастает до 10000-12000 °С. При этой температуре происходит мгновенное оплавление и испарение элементарного объема металла, и на обрабатываемой поверхности образуется лунка. Удаленный металл застывает в диэлектрической жидкости в виде мелких гранул.

Следующий импульс тока пробивает межэлектродный промежуток там, где расстояние между электродами наименьшее. Процесс эрозии продолжается до тех пор, пока не будет удален весь металл, находящийся на расстоянии, при котором возможен электрический пробой при заданном напряжении. Для продолжения процесса необходимо постоянно сближать электроды до указанного расстояния. Электроды сближаются автоматически с помощью следящих систем.

При **электроискровой обработке** используют импульсные искровые разряды между электродами, один из которых - обрабатываемая заготовка, а другой - инструмент-катод.

Схема электроискрового станка с генератором импульсов RC приведена на рис. 4.39. Конденсатор C , включенный в зарядный контур, заряжается через резистор R от источника постоянного тока напряжением 100-200 В. Когда напряжение на электродах 1 и 3, образующих разрядный контур, достигает пробойного, образуется канал проводимости, через который осуществляется искровой разряд энергии, накопленной конденсатором. Продолжительность импульса составляет 20-200 мкс.

Обработку ведут в ваннах, заполненных диэлектрической жидкостью (керосином, минеральным маслом).

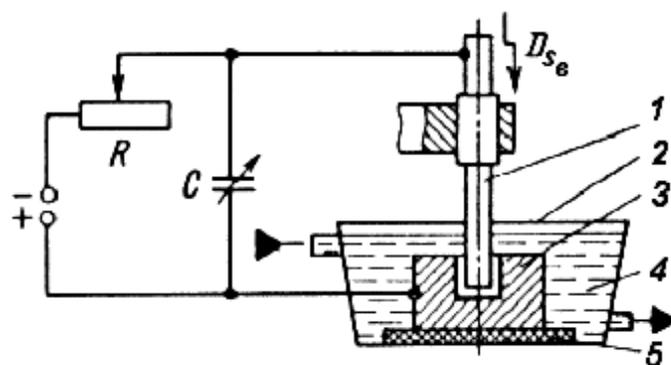


Рис. 4.39. Схема электро-искрового станка

Жидкость исключает нагрев электродов, охлаждает продукты разрушения, уменьшает боковые разряды между инструментом и заготовкой, что повышает точность обработки. Инструменты-электроды изготовлены из медно-графитовых и других материалов. Эффективность обработки достигает 2000 мм³/мин при шероховатости поверхности 0,2-4 мкм.

Эффект эрозии при одних и тех же параметрах электрических импульсов для разных металлов различен. Зависимость интенсивности эрозии от свойств

металлов называют *электроэрозионной обрабатываемостью*. Если для стали ее принять за единицу, то для других материалов она равна: твердые сплавы - 0,5; титан - 0,6; никель - 0,8; медь - 1,1; латунь - 1,6; алюминий - 4.

Электроискровым методом получают сквозные и глухие отверстия любого сечения, отверстия с криволинейными осями, вырезают заготовки из листа, выполняют плоское, круглое и внутреннее шлифование, клеймят детали.

Электроискровую обработку применяют для изготовления деталей штампов и пресс-форм, фильер, режущего инструмента, сеток, сит, деталей топливной аппаратуры из твердых сплавов, труднообрабатываемых сталей и сплавов, тугоплавких металлов и сплавов.

При *электроимпульсной обработке* используются электрические импульсы большей длительности (5-10 мс), в результате чего происходит дуговой разряд, а это обеспечивает более высокую производительность обработки. Такой способ наиболее целесообразно применять при предварительной обработке заготовок из твердых сплавов, коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов.

Высокочастотную электроискровую обработку применяют для повышения точности и уменьшения шероховатости поверхностей. Метод основан на использовании электрических импульсов малой мощности при частоте 100-150 кГц. Производительность метода в 30-50 раз выше электроискрового при значительном увеличении качества обработки.

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом - инструментом и удалении размягченного металла из зоны обработки механическим способом (рис. 4.40). Источником тепла в зоне обработки служат импульсные дуговые разряды. Метод применяют для обработки крупных деталей из углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких и специальных сплавов.

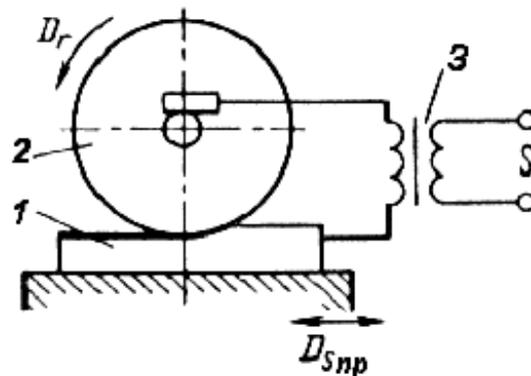


Рис. 4.40. Схема электроконтактной обработки

Электроконтактную обработку используют при обрубке и зачистке отливок, зачистке проката и т. п. Метод не обеспечивает высокой точности, но имеет высокую производительность за счет использования больших электрических мощностей.

4.9.3. Электрохимические методы обработки

Электрохимическая обработка основана на законах анодного растворения металлов при электролизе. При прохождении электрического тока через электролит на поверхности заготовки, включенной в электрическую цепь и являющейся анодом, происходят химические реакции, и поверхностный слой металла превращается в химическое соединение. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом.

Производительность процесса зависит от электрохимических свойств электролита, обрабатываемого токопроводящего материала и плотности тока.

Электрохимическое полирование (рис. 4.41) выполняют в ванне 1, заполненной электролитом 4, которым служат растворы кислот или щелочей.

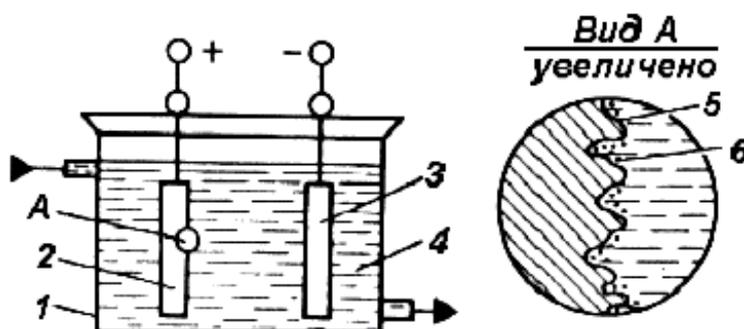


Рис. 4.41. Схема электро-химического полирования

Обрабатываемую заготовку 2 подключают к аноду; электродом-катодом 3 служит металлическая пластинка из свинца, меди, или стали. Для интенсификации процесса электролит 4 нагревают до температуры 40-80 °С.

При подаче напряжения на электроды начинается процесс растворения металла заготовки-анода. Растворение происходит главным образом на выступах 5 микронеровностей поверхности вследствие более высокой плотности тока на их вершинах. Кроме того, впадины 6 между микровыступами заполняются продуктами растворения: оксидами или солями, имеющими пониженную электропроводность. В результате избирательного растворения микронеровности сглаживаются, и обрабатываемая поверхность приобретает металлический блеск.

Электрополирование позволяет одновременно обрабатывать партию заготовок по всей их поверхности. Этим методом готовят поверхности дета-

лей под гальванические покрытия, доводят рабочие поверхности режущего инструмента, получают тонкие ленты и фольгу, очищают и декоративно отделывают детали.

Электрохимическая размерная обработка выполняется в струе электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток, образуемый заготовкой-анодом 2 и инструментом-катодом 1 (рис. 4.42). Струя электролита растворяет образующиеся на заготовке-аноде соли и удаляет их из зоны обработки; при этом обрабатывается вся поверхность заготовки, находящаяся под активным воздействием катода, что обеспечивает высокую производительность процесса.

Точность обработки значительно повышается при использовании импульсного напряжения и при уменьшении рабочего зазора между заготовкой и инструментом. Для контроля зазора используют высокочувствительные элементы, встроенные в следящую систему.

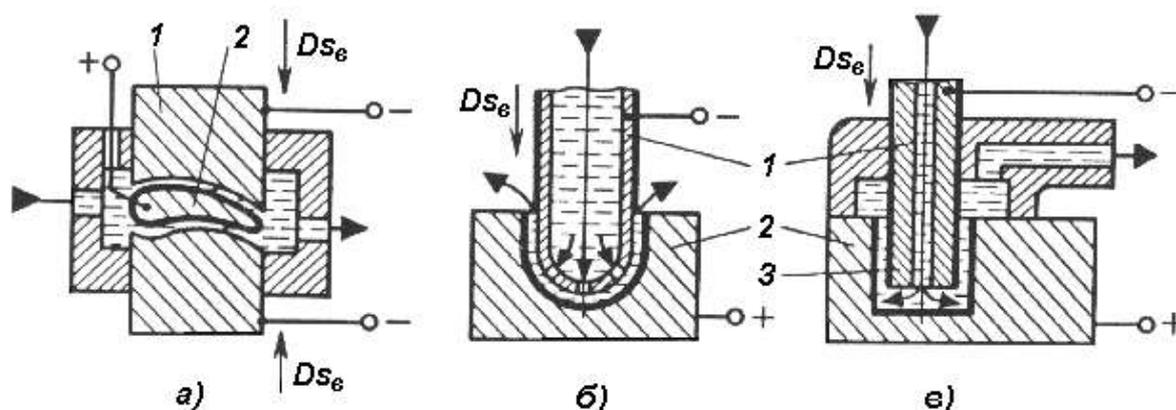


Рис. 4.42. Схемы электрохимической размерной обработки

На рис. 4.42 приведены схемы обработки заготовок в струе проточного электролита: турбинной лопатки (а), штампа (б) и схема прошивания сквозного отверстия (в). Способ применяют для обработки заготовок из высокопрочных сплавов, карбидных и труднообрабатываемых материалов.

Для электрохимической размерной обработки используют нейтральные электролиты.



5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сваркой называется технологический процесс получения неразъемных соединений из металлов, сплавов и других однородных материалов в результате образования атомно-молекулярных связей между частицами (атомами) соединяемых заготовок.

Процесс сварки является одним из наиболее совершенных, экономически выгодных, высокопроизводительных и в значительной степени механизированных технологических процессов. Поэтому сварку широко применяют практически во всех отраслях машиностроения и строительной промышленности. Сварку, как основной технологический процесс, используют в судостроении при изготовлении цельносварных корпусов судов, при строительстве домен, резервуаров для хранения жидкости и газов, нефте- и газопроводов, в станкостроении при изготовлении ответственных узлов станков (элементов станин, коробок скоростей, крупногабаритных шпинделей, масляных и др. баков и пр.), в сельхозмашиностроении и автомобилестроении при изготовлении цельносварных агрегатов, кузовов, топливных баков и многих других машин и металлоконструкций. Особенно экономически выгодно применение сварки при изготовлении новых изделий с заменой крупногабаритных цельнолитых и кованных узлов машин на комбинированные лито-сварные, ковано-сварные и прокатно-сварные. Такая замена выгодна, если конструкция имеет сложную геометрическую форму и большую массу.

Краткая историческая справка

Археологами найдены сварные изделия, которые относятся к VIII-VII в.в. до н. э. Родоначальницей всех видов сварки является кузнечная сварка (медь, бронза, железо, сталь). Кузнечная сварка была единственной до второй половины XIX в.

1802 г. - Академик Петербургской академии наук Василий Владимирович Петров впервые зажег стабильную электрическую дугу.

1877 г. - Профессор Э. Томсон (США) запатентовал способ стыковой контактной сварки.

1882 г. - Изобретатель Николай Николаевич Бенардос (Россия) произвел электрическую дуговую сварку угольным электродом и получил патент.

1887 г. - Н. Н. Бенардос получил патент на точечную контактную сварку (угольными электродами).

1888 г. - Николай Гаврилович Славянов, начальник пермских пушечных заводов, изобрел, разработал и внедрил в производство электрическую дуговую сварку металлическим электродом. В настоящее время это самый распространенный способ сварки во всем мире.

1895 г. - Французский химик Ле Шателье зажег ацетиленокислородное пламя.

1902 г. - Французские инженеры Пикар и Фуше создали газовые горелки и газовую сварку (автогенная сварка - так этот способ назывался до середины XX в.).

1929 г. - Д. А. Дульчевский, советский инженер, разработал первый автомат для дуговой электрической сварки.

1930 г. - В Швеции Д. Кельберг предложил применять качественные покрытия электродов для ручной дуговой сварки.

1941 г. - На Урале танки Т-34 сваривались на конвейере автоматической сваркой под флюсом, разработанной академиком Е. О. Патоном.

1941 г. - Перед началом Великой Отечественной войны преподаватель Томского политехнического института В. А. Надежницкий защитил в Ленинградском политехническом институте кандидатскую диссертацию по разработке и изготовлению промышленного автомата для электрической дуговой сварки.

5.1. Физические основы процесса сварки

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.

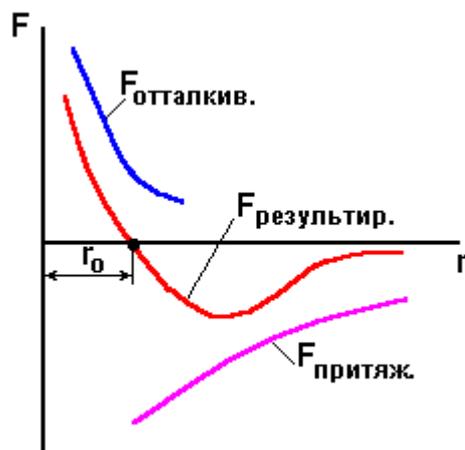


Рис. 5.1. Изменение силы межатомного взаимодействия в зависимости от расстояния

Узлы решетки колеблются около нейтрального положения, причем амплитуда их колебаний увеличивается с повышением температуры. Расстояние между атомами в кристалле определяется силами межатомного взаимодействия (рис. 5.1). 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 Г). Таким образом, чтобы получить прочное сварное соединение, необходимо сблизить поверхностные атомы двух тел на расстояние 3-5 Г.

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. 5.2), и прочного соединения не произойдет.



Рис. 5.2. 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).

5.2. Электрическая дуга и источники ее питания

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) 1 дугой прямого действия 2 (рис. 5.3, 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. 5.3, б). Одновременно расплавляется основной металл 3 и электрод 1, который пополняет сварочную ванну жидким металлом.

3) **Сварка косвенной дугой** 5 (рис. 5.3, в), горячей между двумя неплавящимися электродами 1 (в настоящее время способ почти не применяется).

4) **Сварка трехфазной дугой** 6 (рис. 5.3, 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).

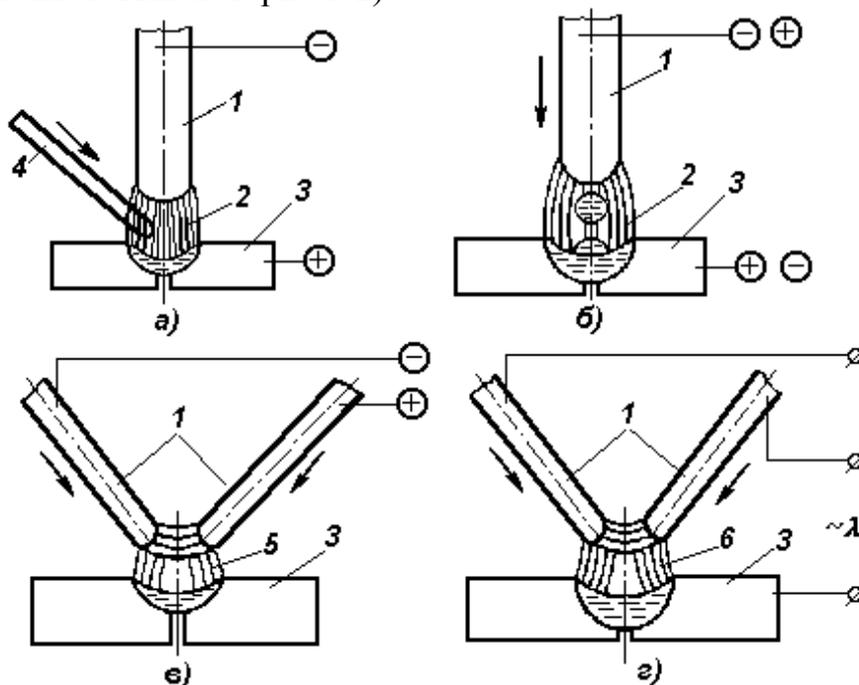


Рис. 5.3. Схемы электродуговой сварки

5.2.1. Понятие об электрической сварочной дуге и ее свойствах

Сварочная дуга - мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе ее горения. Процесс зажигания дуги включает три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3-6 мм и возникновение устойчивого горения дуги. Короткое замыкание (рис. 5.4, а) выполняется для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2. При отводе электрода (рис. 5.4, б) с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается эмиссия электронов 3. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации 4. В результате дуговой промежуток становится электропроводным и возникает устойчивая сварочная дуга 6 (рис. 5.4, в).

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):

$$Q = K \cdot I_{св} \cdot U_{д},$$

где K для постоянного тока равен единице, для переменного тока - 0,7-0,9;
 $I_{св}$ - сварочный ток, А; $U_{д}$ - напряжение дуги, В.

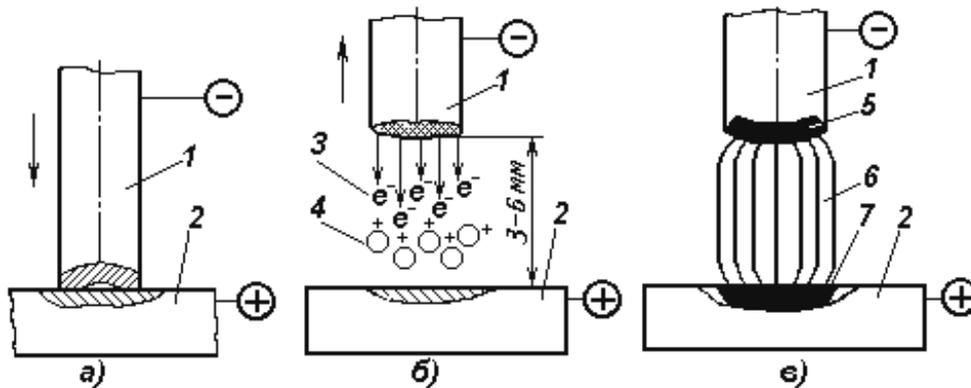


Рис. 5.4. Схема процесса зажигания дуги

Однако не вся мощность дуги полностью расходуется на нагрев и расплавление электрода и свариваемого металла, часть ее теряется в окружающую среду. КПД дуги для автоматической сварки под флюсом составляет 0,9; для электрошлаковой - 0,7; для ручной дуговой - 0,8; для сварки в защитных газах - 0,6.

Тепловой баланс сварочной дуги представлен схематично на рис. 5.5: для ручной дуговой сварки - на рис. 5.5, а, б, для автоматической под флюсом - на рис. 5.5, в, где 1- электрод, 2- основной металл, 3 - шов, 4 - флюс.

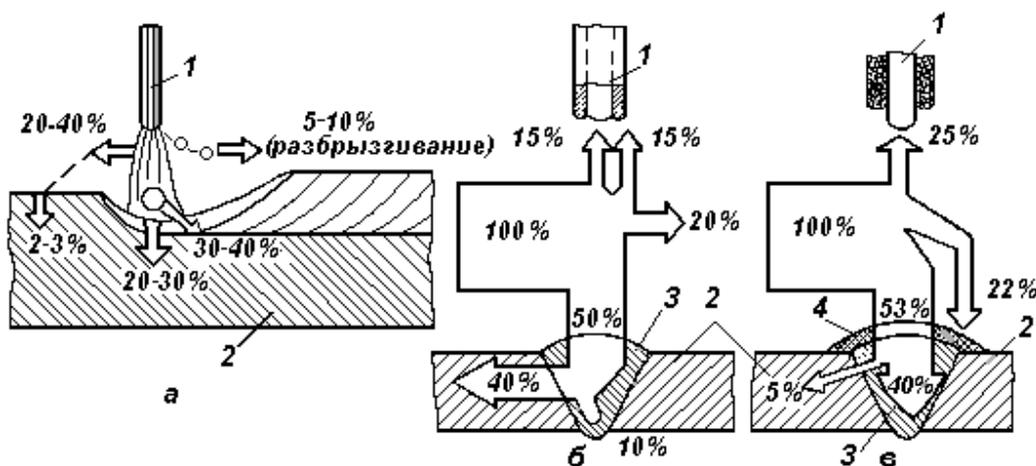


Рис. 5.5. Тепловой баланс сварочной дуги

Электрические свойства дуги описываются *статической вольтамперной характеристикой*, представляющей зависимость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 5.6).

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.

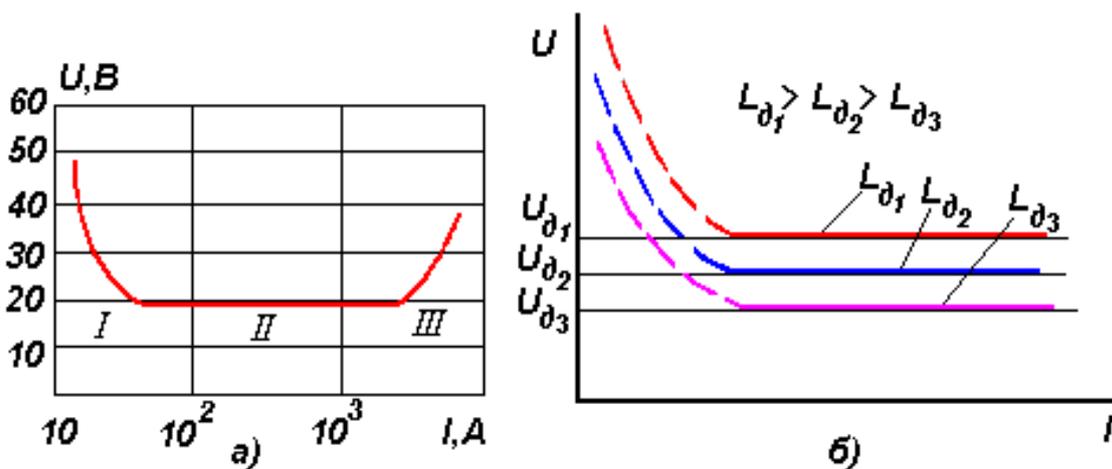


Рис. 5.6. Статическая характеристика дуги (а)
и зависимость напряжения дуги U_d от ее длины L_d (б)

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 :

$$U_d = \alpha + \beta \cdot L_d,$$

где α и β - опытные коэффициенты (для стальных электродов $\alpha=10$ В, $\beta=2$ В/мм). Из приведенной зависимости следует, что для сохранения напряжения дуги неизменным необходимо длину дуги поддерживать постоянной (рис. 5.6, б).

5.2.2. Источники сварочного тока

Обычные осветительные и силовые источники тока не годятся для сварки. Для питания сварочной дуги требуются источники со специальной

внешней характеристикой. Внешней характеристикой источника называется зависимость напряжения на его выходных клеммах от тока в электрической цепи. Внешние характеристики могут быть следующих видов: падающая 1, пологопадающая 2, жесткая 3 и возрастающая 4 (рис. 5.7).

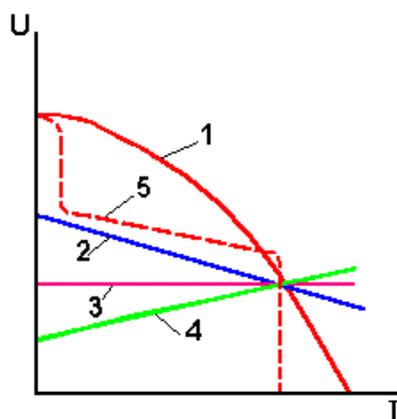


Рис. 5.7. Внешние характеристики источников сварочного тока

Оптимальным, с точки зрения требований сварки, будет источник тока с *идеализированной* внешней характеристикой 5. Источник тока выбирается в зависимости от вольт-амперной характеристики дуги, соответствующей принятому способу сварки.

Рассмотрим условия зажигания дуги и ее стабильного горения. Для этого наложим на внешнюю характеристику источника тока статическую вольт-амперную характеристику дуги (рис. 5.8).

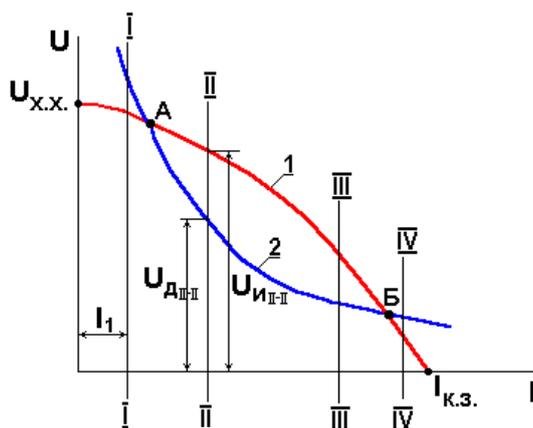


Рис. 5.8. Соотношение характеристики дуги и падающей характеристики источника тока и сварке

Здесь $U_{x.x.}$ - напряжение холостого хода (первичная цепь сварочного трансформатора замкнута, вторичная разомкнута, дуга не горит);
 $I_{к.з.}$ - ток короткого замыкания при зажигании дуги;

А - точка зажигания дуги, Б - точка стабильного горения дуги;

1 - внешняя характеристика источника тока, 2- статическая характеристика дуги.

Пусть при зажигании дуги в точке А под воздействием внешних факторов (квалификация сварщика, колебания в электросети, изменение степени ионизации и т. д.) ток уменьшится и примет значение I_1 . В этом случае напряжение, выдаваемое источником на дугу, будет меньше, чем требуется дуге в соответствии с ее характеристикой, и дуга погаснет.

В случае параметров II-II при зажигании дуги напряжение, выдаваемое источником тока U_{II-II} , будет больше, чем требуется дуге ($U_{дII-II}$), - дуга будет разгораться и придет в точку Б - точку стабильного горения дуги. При подобном рассмотрении условий горения дуги в точке Б мы получаем, что в любом случае (III-III и IV-IV) отклонения параметров дуги от точки Б параметры автоматически будут восстанавливаться, приводя в точку Б - точку стабильного горения дуги. Отсюда видно, что зажечь дугу труднее, чем поддерживать горение зажженной дуги.

Таким образом, основные требования, предъявляемые к сварочному источнику тока, можно сформулировать так:

1. Быть безопасным для сварщика.
2. Обеспечивать стабильное горение дуги.
3. Источник питания должен быть рассчитан на работу в режиме короткого замыкания и иметь устройство для регулирования тока дуги.

В целях безопасности для сварщика сварочные источники изготавливаются с напряжением холостого хода не выше 70-80 В.

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные генераторы и сварочные выпрямители).

5.2.2.а. Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы более распространены, чем источники постоянного тока, так как обладают рядом преимуществ. Сварочные трансформаторы проще в эксплуатации, значительно долговечнее и дешевле.

Сварочные трансформаторы, как правило, имеют падающую характеристику и используются для ручной дуговой сварки и автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы с жесткой характеристикой применяют для электрошлаковой сварки.

Сварочные трансформаторы могут быть выполнены по электросхеме с **нормальным магнитным рассеянием** и по электросхеме с **повышенным магнитным рассеянием**. К первой схеме относятся трансформаторы с отдельным дросселем 4 (рис. 5.9, а) и с совмещенным дросселем (рис. 5.9, б). По второй схеме выполнены трансформаторы с подвижным магнитным шунтом (рис. 5.9, в) и с подвижной обмоткой (рис. 5.9, г).

Сварочный трансформатор снижает напряжение сети до напряжения холостого хода (60-80 В), а *дроссель*, обладающий повышенным индуктивным сопротивлением, служит для получения падающей внешней характеристики. Дроссель также служит для плавного регулирования сварочного тока путем изменения воздушного зазора 3. Так, например, с увеличением зазора индуктивное сопротивление дросселя уменьшается, а сварочный ток увеличивается.

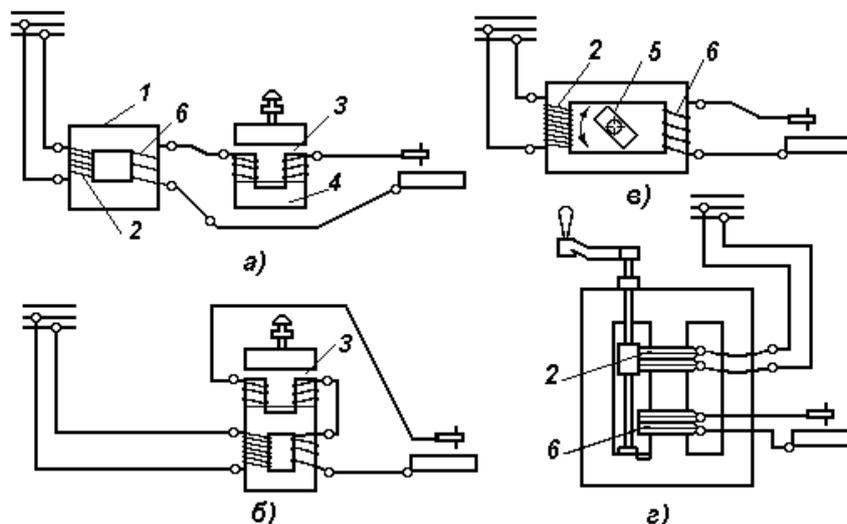


Рис. 5.9. Схемы сварочных трансформаторов:
1 - магнитопровод, 2 - первичная обмотка, 3 - зазор, 4 - дроссель,
5 - подвижный шунт, 6 - вторичная обмотка

5.2.2.б. Сварочные генераторы

Отечественной промышленностью поставляются сварочные генераторы с падающей и жесткой внешней характеристикой, а также универсальные сварочные генераторы, позволяющие получать и падающую, и жесткую внешнюю характеристику. Сварочные генераторы в настоящее время остаются, главным образом, в агрегатах для сварки в полевых условиях, где привод их осуществляется от двигателя внутреннего сгорания. Во всех остальных областях применения сварки на постоянном токе они вытесняются сварочными выпрямителями.

Следует отметить, что постоянный ток предпочтителен в технологическом отношении: при его применении повышается устойчивость горения дуги. При сварке на переменном токе (от сварочного трансформатора) дуга горит неустойчиво, так как через каждые 0,01 с напряжение и ток дуги проходят через нулевые значения, что приводит к временной деионизации дугового промежутка.

5.2.2.в. Сварочные выпрямители

Это устройства для преобразования переменного тока в постоянный. Перед генераторами выпрямители имеют ряд преимуществ:

1. Бесшумность и надежность в работе.
2. Просты в изготовлении и в обслуживании.
3. Более высокий КПД.
4. Имеют значительно меньшую массу.

К недостаткам выпрямителей следует отнести их большую чувствительность к колебаниям напряжения в сети. Для устранения этого недостатка применяют стабилизаторы.

Сварочный выпрямитель состоит из двух основных частей:

1. Понижающий трансформатор с регулирующим силу тока устройством, с падающей или жесткой характеристикой.
2. Блок выпрямителей, состоящий из набора полупроводников (селеновых или кремниевых).

Селеновые выпрямители менее чувствительны к перегрузкам, возникающим при коротких замыканиях в процессе сварки.

5.2.2.г. Устройства для повышения устойчивости горения дуги

1. *Осцилляторы* - это устройства, преобразующие ток промышленной частоты низкого напряжения в ток высокой частоты (150-500 кГц) и высокого напряжения (2000-6000 В).

Повышенное напряжение пробивает газовый промежуток без соприкосновения электрода с изделием, ионизирует этот воздушный зазор и обеспечивает стабильное горение сварочной дуги переменного тока.

Высокая частота устраняет физиологическое воздействие тока на организм сварщика, т. к. ток при частоте 50 кГц вследствие поверхностного эффекта проходит по тонкому наружному слою кожных покровов человеческого тела, не задевая нервных окончаний.

Осциллятор подключается параллельно с дугой.

Он используется для сварки сталей малых толщин, при сварке алюминия и его сплавов.

2. *Импульсные стабилизаторы* обеспечивают подачу синхронизированных импульсов повышенного напряжения в момент перехода кривой силы тока через нуль. Применяются импульсные генераторы при сварке алюминия и его сплавов в аргоне неплавящимся электродом и для сварки под флюсом.

5.3. 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, окалины, 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. Точность сборки контролируется специальным мерительным инструментом (рис. 5.10).

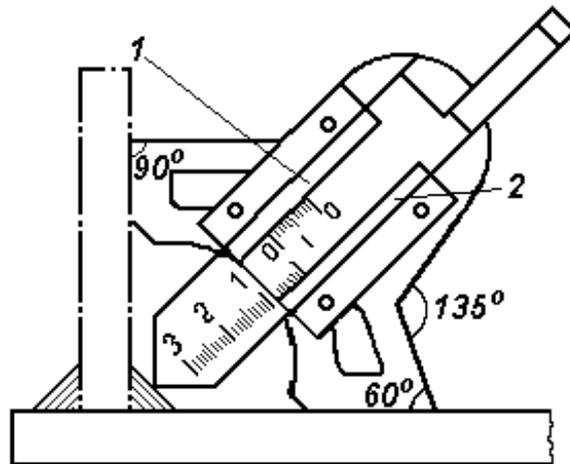


Рис. 5.10. Универсальный измеритель швов: 1, 2 - мерительные линейки

Сварочный пост (рис. 5.11) должен иметь источник тока 1 с кабелями, сварочный стол 2 с вытяжной верхней вентиляцией 3 и нижней вентиляцией 4 в виде щелей в столе (применяется при сварке в защитных газах, которые тяжелее воздуха), электрододержатель 5.

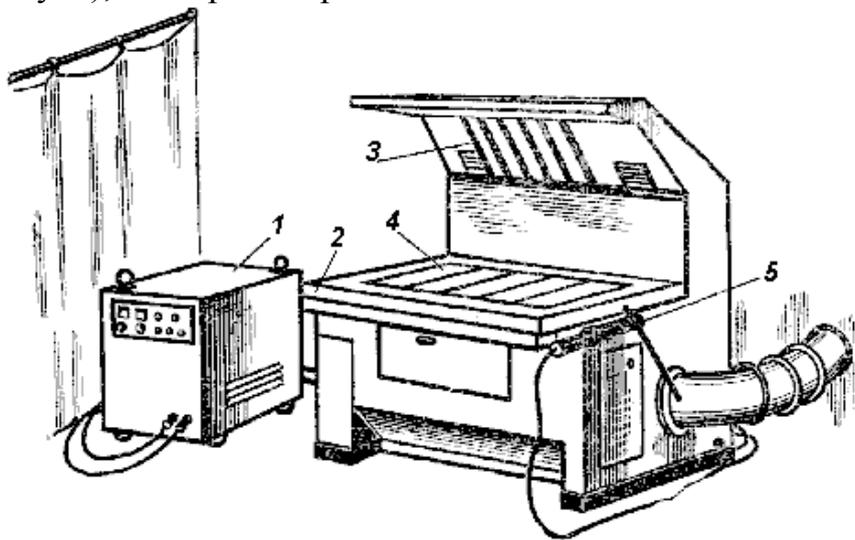


Рис. 5.11. Общий вид стационарного поста для ручной дуговой сварки

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 (рис. 5.12). Электрод состоит из сварочной проволоки 1 и покрытия 2. При сварке покрытие образует большое количество защитного газа 3 и шлака 4.

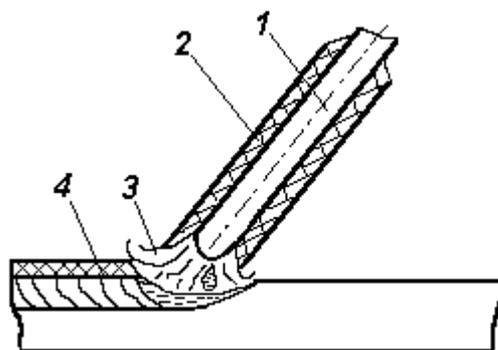


Рис. 5.12. Схема процесса ручной дуговой сварки

5.3.1. Сварочная проволока

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).

Буквы в марках сталей означают легирующий элемент: Б - ниобий, В - вольфрам, Г - марганец, Д - медь, М - молибден, Н - никель, С - кремний, Т - титан, Ф - ванадий, Х - хром, Ю - алюминий. Цифры после букв Св (сварочная) указывают содержание углерода в сотых долях процента. Цифры после букв указывают содержание данного элемента в процентах. Если после буквы цифры нет, то содержание элемента меньше 1 %. Буква А в конце марки указывает, что сталь высококачественная, т. е. со сверхнизким содержанием вредных примесей (серы и фосфора).

5.3.2. Классификация электродов 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_2 ; H_2 ; CO .

Неорганические - газ и шлак: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

2. **Легированные** 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:



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. Три покрытия являются кислыми: 1) рудно-кислое, 2) рутиловое и 3) целлюлозное - они состоят из кислых окислов. Четвертое покрытие состоит из основных окислов.

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. *Рутиловое 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 рутиловых 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 НРС).

5.3.3. 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.

Режим ручной дуговой сварки включает следующие параметры.

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

$$d = S/2 + 1 \text{ (мм)}$$

или по таблицам из справочника:

Толщина свариваемых листов, мм	1-2	3	4-5	> 6
Диаметр электрода, мм	1,5-2,5	3	3-4	4-6

Сварочный ток определяется по диаметру электрода по формуле: $I = K \cdot d$, где K - коэффициент, для малоуглеродистой стали $K=40-50$, для высоколегированной стали $K=25-40$, или выбирается по таблицам:

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:

$$L = d/2 + 1 \text{ (мм)},$$

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.

$$\text{Скорость сварки } V_{св} = \alpha_n \cdot I_{св} / (3600 \cdot \gamma \cdot F_n),$$

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.

Техника сварки включает движения электрода (1 - в зону сварки, 2 - вдоль шва, 3 - колебания поперек шва) и наклон электрода α (рис. 5.13, а).

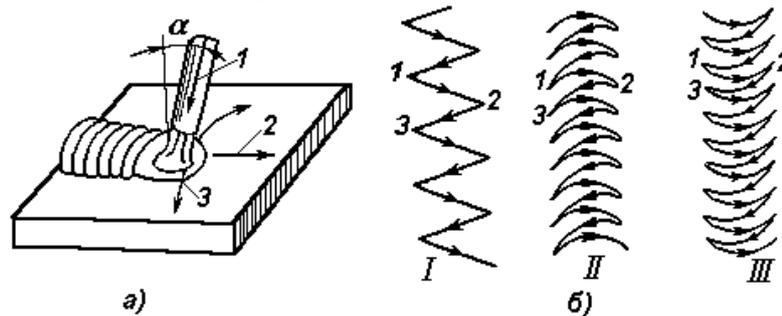


Рис. 5.13. Схема движений электрода

Изменяя наклон электрода, сварщик может регулировать глубину проплавления металла, способствовать лучшему формированию валика шва и влиять на скорость охлаждения ванны.

Узкий валик накладывается без поперечных колебаний электрода при проваре корня шва и сварке тонколистовых сталей. Во всех других случаях применяют валики, уширенные с помощью поперечных колебаний электрода (точки 1-2-3, рис. 5.13, б).

В точках 1, 2, 3 скорость перемещения электрода уменьшается, что способствует прогреванию кромок.

На рис. 5.14, а показаны варианты движения электрода для прогревания обеих кромок свариваемых листов повышенной толщины, на рис. 5.14, б - движения для прогревания одной кромки при сварке листов разной толщины. Для более интенсивного прогревания середины шва электрод перемещают по схемам, данным на рис. 5.14, в.

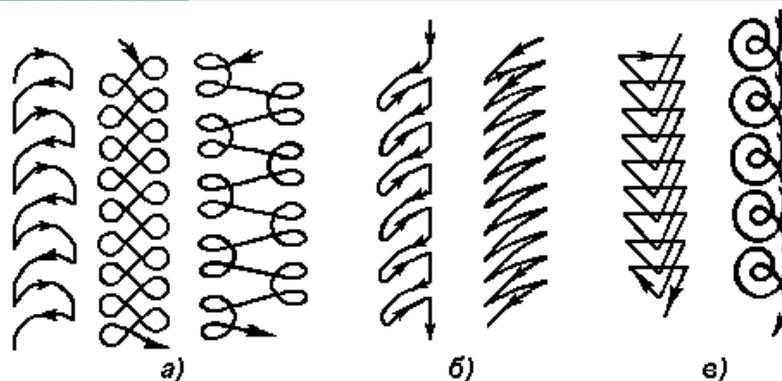


Рис. 5.14. Особые случаи движения электрода

5.3.4. Техничко-экономическое обоснование ручной дуговой сварки

Преимущества:

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.

5.4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

При *автоматической дуговой сварке под флюсом* все сварочные операции вместо сварщика выполняет автомат: зажигание дуги и поддержку стабильного ее горения, защиту сварочной ванны от вредного влияния воздуха, подачу сварочной проволоки и флюса в зону сварки, передвижение дуги вдоль шва, заварку кратера по окончании сварки.

Схема процесса автоматической сварки под флюсом приведена на рис. 5.15.

Электродная проволока 3 из кассеты специальным механизмом с роликами 2 подается в зону сварки со скоростью плавления. Дуга 10 горит между концом электрода и изделием 8 под слоем флюса 5, который подается из бункера. По действием тепла дуги флюс плавится. В результате над сварочной ванной 9 образуется слой полужидкого флюса 4, под защитой которого горит дуга. По мере перемещения дуги в направлении сварки образуется сварной шов 7, покрытый шлаковой коркой 6. Остатки нерасплавленного флюса пневматическим устройством отсасываются, подаются обратно в бункер для флюса и снова используются. Сварочный источник питания подключают к изделию и токоподводящему контакту 1, по которому скользит электродная проволока.

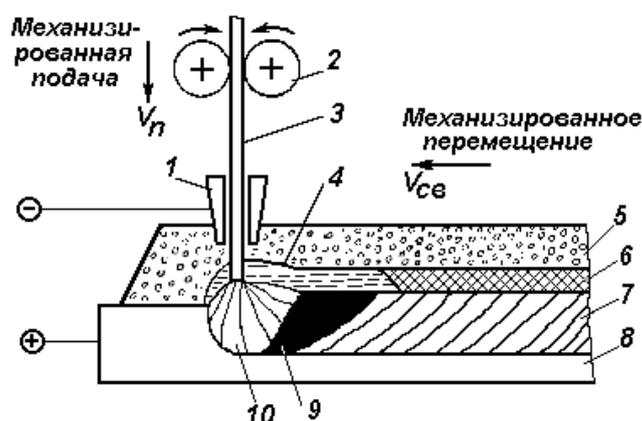


Рис. 5.15. Схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом

Флюс выполняет те же функции, что и электродное покрытие при ручной сварке, обеспечивая стабилизацию дуги, защиту металла, раскисление и легирование ванны.

Автоматическую сварку выполняют либо самоходными сварочными автоматами (тракторами), либо неподвижными сварочными головками, под которыми перемещается изделие.

Сварку сталей под флюсом ведут с использованием электродной проволоки диаметром 1-6 мм при силе тока 150-2000 А. Напряжение на дуге 22-55 В. Скорость сварки 30-50 м/час, но иногда может достигать и 120 м/час.

Сварочный флюс представляет собой сыпучий неметаллический материал, полученный плавлением или грануляцией. По способу изготовления различают плавленые и неплавленые (керамические, полученные методом грануляции) флюсы.

Плавленые флюсы приготавливают плавлением в электропечах из исходных компонентов: марганцевая руда (MnO), кварцевый песок (SiO_2) и плавиковый шпат (CaF_2). Примером таких флюсов могут служить кислые

флюсы ОСЦ-45 и АН-348. Эти флюсы применяются для сварки низкоуглеродистых и малолегированных сталей. Для сварки высоколегированных сталей применяются флюсы типа АН-20 и АН-26 на основе CaO , CaF_2 , Al_2O_3 .

Неплавленные (керамические) флюсы изготавливаются из тех же компонентов, что и электродное покрытие. В отличие от плавленных, они обладают высокой металлургической активностью, но имеют низкую прочность при транспортировке и боятся влаги (гигроскопичны).

Для автоматической сварки применяют два вида автоматов, отличающихся принципом регулирования режима горения дуги:

автоматы *с постоянной скоростью подачи проволоки* используют процесс саморегулирования длины и напряжения дуги (типа ТС-17Р, ТС-ПМ-У, УТ-1250-3);

автоматы *с регулируемой скоростью подачи проволоки* во время сварки, скорость зависит от изменений напряжения дуги (АДС-1000-2).

Для полуавтоматической сварки предназначены полуавтоматы типа ПШ-54-У и др.

5.4.1. Технико-экономическое обоснование

Преимущества:

1. Автоматическая сварка под флюсом производительнее ручной в 10 и более раз за счет применения больших сварочных токов (до 2000 А) и непрерывности процесса сварки.

2. Данный способ обеспечивает более эффективное использование тепла дуги: КПД достигает 90 %, а при ручной дуговой сварке составляет порядка 40 %.

3. Большие токи и отсутствие разбрызгивания металла позволяют сваривать заготовки большой толщины (до 20 мм за один проход без разделки кромок).

Недостатки:

1. Автоматическая сварка возможна только в нижнем положении.

2. Ограничено применение сварки: только для прямолинейных швов и швов небольшой кривизны.

3. При сварке под флюсом невозможно наблюдать за процессом и контролировать его.

Применение.

Под флюсом сваривают все низкоуглеродистые стали (Ст1, Ст2, Ст3, 10, 15, 25), низколегированные и высоколегированные стали, медь, титан и их сплавы, алюминиевые сплавы типа АМгб.

Автоматическую сварку под флюсом применяют в серийном и массовом производстве прямолинейных и кольцевых швов на металле толщиной 2-100 мм. Автоматическую сварку применяют при изготовлении паровых котлов, резервуаров для хранения газов и жидкостей, корпусов судов, доменных печей, мостовых балок, сварных труб и т. п.

5.5. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка представляет собой один из способов сварки плавлением, в котором теплота, необходимая для расплавления основного и электродного металла, выделяется в расплавленном флюсе (шлаковой ванне) при прохождении через него электрического тока. Эту сварку, в отличие от сварки под флюсом, выполняют при вертикальном расположении заготовок (или наклонном расположении под углом 45°) с зазором между ними 20-30 мм и с принудительным формированием сварного шва.

Схема ЭШС показана на рис. 5.16. Источник переменного тока 7 подключен к сварочному электроду 4 и к свариваемым заготовкам 1. Электрод погружен в расплавленный флюс (шлаковую ванну) 3, обладающий электропроводимостью.

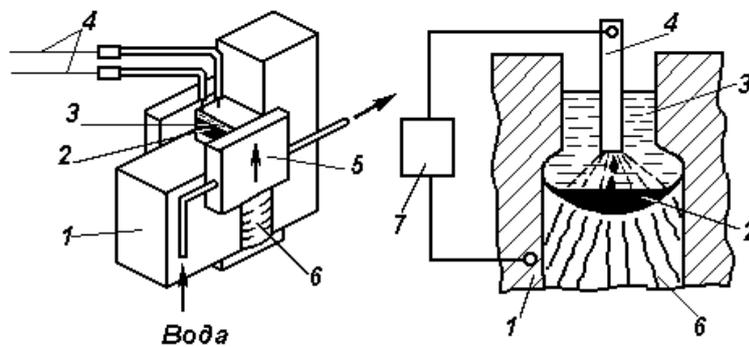


Рис. 5.16. Схема процесса электрошлаковой сварки

Первоначально процесс ЭШС протекает так же, как и при дуговой автоматической сварке под флюсом. Процесс сварки начинается с зажигания мощной электрической дуги (одной или нескольких) под слоем флюса на подкладке. После образования ванны из жидкого шлака, которая становится электропроводящей, процесс дуговой сварки переходит в электрошлаковый. Горение дуги прекращается, и плавление электрода происходит за счет тепла, выделяющегося, на основании закона Джоуля-Ленца, при прохождении электрического тока через жидкий шлак. Образуется сварочная ванна 2. Шлаковая и сварочная ванны удерживаются от вытекания плотно прижатыми, охлаждаемыми водой ползунами 5, которые по мере образования сварного шва 6 перемещаются вверх.

По типу применяемого электрода различают сварку электродной проволокой, пластинчатым электродом и плавящимся мундштуком.

5.5.1. Сварка электродной проволокой

Эта сварка является основным методом ЭШС прямолинейных и круговых швов на металле толщиной до 600 мм. Заготовки толщиной до 150 мм можно сваривать одним электродом, совершающим поперечные колебания



для равномерного разогрева шлаковой ванны по всей толщине. Металл толщиной более 150 мм сваривают тремя, а иногда и большим числом проволок.

Для сварки применяют проволоку диаметром 2-3 мм. Сварочный ток составляет 750-1000 А. В качестве источников питания применяют сварочные трансформаторы для ЭШС с жесткой внешней характеристикой.

5.5.2. Сварка пластинчатым электродом

Этим методом сваривают прямолинейные швы длиной не более 1,5 м. Толщина пластинчатого электрода составляет 1/3 ширины зазора, а длина в 3,5 раза больше длины шва. Во время сварки электрод опускается в шлаковую ванну специальным механизмом. Преимуществом этого метода является простота применяемой аппаратуры и повышенная устойчивость процесса сварки. К недостаткам следует отнести необходимость мощных источников питания (сила тока 1500-2000 А).

5.5.3. Сварка плавящимся мундштуком

Этим методом сваривают заготовки большой толщины (более 500 мм) и соединяют детали сложной формы. Плавящийся мундштук представляет собой пластинчатый электрод с формой и размерами свариваемого соединения.

Пластина (плавящийся мундштук) имеет канал для подачи электродной проволоки в зону сварки. Мундштук расплавляется в процессе сварки, а непрерывно подающаяся проволока служит присадочным металлом для образования шва. Особенно целесообразен плавящийся мундштук для сварки криволинейных швов переменного сечения, т. к. он обеспечивает равномерное распределение присадочного металла по сечению.

5.5.4. Оборудование для электрошлаковой сварки

Для ЭШС применяются автоматы А-820 и А433Р для сварки вертикальных швов. В этом случае подача сварочной проволоки в зону сварки, поддержание нужного режима сварки, вертикальное перемещение ползунов и т. д. выполняется автоматически.

Автомат А535 предназначен для сварки прямолинейных и кольцевых швов стыковых, угловых и тавровых соединений. Сварка ведется электродной проволокой или пластинами. Для сварки в монтажных условиях и труднодоступных местах применяется полуавтомат А671Р (для заготовок толщиной от 16-50 мм, расположенных вертикально или под углом 45°).

5.5.5. Технико-экономическое обоснование

Преимущества:

1. ЭШС имеет производительность в 5-15 раз выше по сравнению с автоматической сваркой под флюсом, т. к. позволяет сваривать за один проход металлы любой толщины с применением в 1,5-2 раза большей величины то-

ка. При этом чем больше толщина свариваемых заготовок, тем выше экономический эффект ЭШС.

2. ЭШС уменьшает расход сварочной проволоки, т. к. сварка ведется без разделки свариваемых кромок.

3. Обеспечивается получение металла шва более высокого качества за счет хорошего удаления вредных примесей и газов из металла. Это объясняется значительным временем нахождения металла шва в расплавленном состоянии, а также направлением сварки снизу вверх (при этом все примеси оттесняются на поверхность шлаковой ванны) и отсутствием дуги.

Недостатки:

1. Наблюдается перегрев металла шва и околошовной зоны, что приводит к росту зерна; требуется термическая обработка.

2. Плохая сменяемость флюса в процессе сварки; требует периодического отсасывания шлаковой ванны и добавки флюса.

Применение:

1. Этим способом можно сваривать за один проход без разделки кромок вертикально или под углом 45° установленные заготовки толщиной 50-2000 мм из любой стали, меди, алюминия, титана и их сплавов.

2. ЭШС особенно выгодно применять в тяжелом и транспортном машиностроении для изготовления комбинированных сварно-литых и сварнокованных конструкций: станины и детали сложных прессов, крупных станков, прокатных станов, коленчатых валов судовых двигателей, роторы и валы гидротурбин, элементы котлов высокого давления и т. п.

5.6. Дуговая сварка в защитных газах

Сущность процесса заключается в том, что в зону действия сварочной дуги подается непрерывно с помощью специальной сварочной горелки защитный газ. Эта локальная (местная) защита (рис. 5.17) от вредного воздействия воздуха создается потоком газа 1, который истекает из сопла 2, расположенного концентрически относительно сварочного электрода 3. Дуга горит между электродом и изделием 5, образуя сварочную ванну 4.

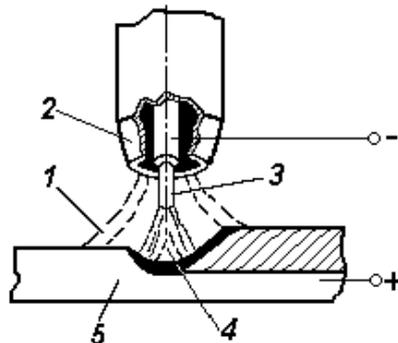


Рис. 5.17. Схема дуговой сварки в атмосфере защитного газа

При этом используют керамическое или медное охлаждаемое водой сопло.

Защитной средой служат газы:

- 1) Инертные одноатомные - аргон, гелий.
- 2) Нейтральные двухатомные - азот, водород.
- 3) Активные - углекислый газ.

В связи с тем, что гелий в десять раз легче аргона, расход его при сварке на 30-40 % больше, чем расход аргона, и это свойство ограничивает применение гелия. Сравнительно ограниченное применение находит и атомно-водородная сварка из-за высокого напряжения холостого хода, которое для облегчения зажигания дуги должно составлять 250-300 В. При этом рабочее напряжение 30-120 В, сварочный ток небольшой (10-70 А). Таким образом, существует опасность поражения сварщика током холостого хода высокого напряжения.

Наибольшее применение нашли аргонодуговая сварка и сварка в среде углекислого газа.

5.6.1. Аргонодуговая сварка

Аргонодуговую сварку можно выполнять плавящимися и неплавящимися электродами. По степени автоматизации сварка неплавящимся электродом может быть ручной и автоматической с подачей или без подачи дополнительного присадочного материала, а сварка плавящимся электродом - полуавтоматической или автоматической.

В качестве неплавящегося электрода используют вольфрамовые прутки диаметром 1-8 мм. (Вольфрам имеет температуру плавления 3600 °С.) Большой стойкостью обладают вольфрамовые прутки ВТ15, ВТ20 с добавкой 1,5-2,0 % двуокиси тория. Торий способствует легкому зажиганию дуги и ее стабильному горению, но обладает некоторой радиоактивностью. В этом отношении предпочтительнее вольфрамовые прутки с добавками около 2 % оксида лантана или оксида иттрия. Расход вольфрамового электрода примерно 0,5 г на 1 метр шва при силе тока 300 А.

Защитный газ *аргон* является инертным газом, без цвета, без запаха, тяжелее воздуха (это требует вытяжной нижней вентиляции или специального газоотсоса). Аргон обладает хорошей ионизирующей способностью, поэтому обеспечивает стабильное горение дуги, в том числе и при малых сварочных токах. Он не образует химических соединений и нерастворим в жидких металлах. Аргон получают из воздуха, он может быть двух видов: технический и чистый для сварки. Транспортируется аргон в стандартных стальных баллонах серого цвета с черной надписью “Аргон чистый” под давлением 150 атм (15 МПа). Емкость баллона 40 л. Расход аргона при сварке зависит от диаметра электрода и составляет 120-600 л/час. Баллон вмещает 6000 л аргона. Давление газа на выходе из горелки 0,3-0,5 атм.

Большинство металлов сваривается на постоянном токе прямой полярности. Такое включение (“плюс” на изделии) обеспечивает высокую стойкость вольфрамового электрода. Это объясняется тем, что в электрической дуге наибольшее количество теплоты выделяется на аноде (положительный электрод). Поэтому, например, при диаметре электрода 3 мм допускаемая сила тока при прямой полярности 140-280 А, а при обратной полярности - только 20-40 А.

При обратной полярности резко повышается нагрев электродов и их расход. Вместе с тем дуга обратной полярности обладает весьма важным технологическим свойством - удалять с поверхности заготовок оксиды и загрязнения. Особенно важно это свойство при сварке алюминия и его сплавов, на поверхности которых всегда имеется мгновенно образующаяся на воздухе тугоплавкая оксидная пленка Al_2O_3 . При обратной полярности поверхность металла бомбардируется тяжелыми положительно заряженными ионами аргона, которые разрушают оксидные пленки на металле. Этот процесс называется катодным распылением.

Однако, поскольку при постоянном токе обратной полярности стойкость электродов низка, для сварки алюминия, магния и бериллия используют переменный ток. Удаление оксидов происходит в те полупериоды, когда изделие является катодом. Допускаемый переменный ток выше, чем при постоянном токе обратной полярности, и составляет для диаметра электрода 3 мм 100-160 А, что позволяет в определенной степени использовать положительные свойства дуги прямой и обратной полярности.

Ручную сварку вольфрамовым электродом выполняют наклонной горелкой, рис. 5.18. Угол наклона горелки 3 к поверхности свариваемого металла 5 составляет $70-80^\circ$, а присадочная проволока 1 подается под углом $10-15^\circ$. Дуга 6 горит между электродом 4 и изделием под защитой струи газа 2.

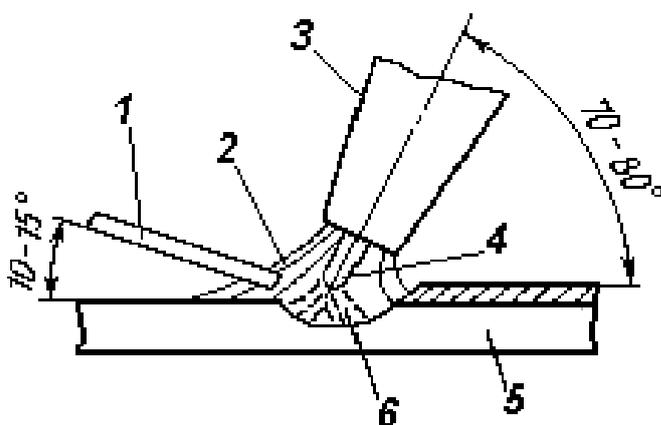


Рис. 5.18. Положение горелки и присадочного прутка при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом

Существуют следующие разновидности аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом: сварка погруженной дугой для увеличения глубины проплавления, сварка с применением флюса, повышающего сосредоточенность теплового потока в пятне нагрева, импульсно-дуговая сварка пульсирующей дугой.

При импульсной дуге шов получается расплавлением отдельных участков с определенным перекрытием. Импульсы дуги чередуются с паузами, во время которых продолжает гореть маломощная дежурная дуга, что обеспечивает надежное горение дуги во время импульса. Регулирование длительности импульсов и пауз позволяет в широких пределах изменять характер кристаллизации шва и влиять на свойства сварных соединений. При сварке тонколистовых материалов особенно заметны преимущества импульсной сварки: улучшается форма шва, снижается остаточная деформация изделия, уменьшается вероятность прожогов.

Аргонодуговую сварку плавящимся электродом применяют для соединения деталей из цветных металлов и легированных сталей. Сварка происходит с капельным или струйным переносом металла электрода в сварочную ванну. Характер переноса металла зависит от плотности тока. При сварке сталей струйный перенос начинается при плотности тока более $60-120 \text{ А/мм}^2$, при сварке алюминия - при 70 А/мм^2 .

Сварку плавящимся электродом в аргоне выполняют на автоматах и полуавтоматах с постоянной скоростью подачи проволоки. Применяют источники питания постоянного тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой (преобразователи типа ПСГ-500, выпрямители ВС-300, ВДГ-301 и др.) и обратную полярность. При такой характеристике источника и высокой плотности тока возрастает эффект саморегулирования дуги, что способствует устойчивости процесса.

5.6.1.а. Полуавтоматическая аргонодуговая сварка

Этот способ совмещает в себе элементы автоматической и ручной сварки. Подача сварочной проволоки из кассеты 6 в горелку 2 по шлангу 3 осуществляется автоматически механизмом подачи 5, а перемещение горелки 2 вдоль кромок заготовок 1 - вручную. В горелку подается также аргон из баллона 4 (рис. 5.19).

В отличие от ручной сварки, полуавтоматический способ позволяет применять более высокие плотности тока и большую скорость подачи сварочной проволоки, что обеспечивает повышенную производительность.

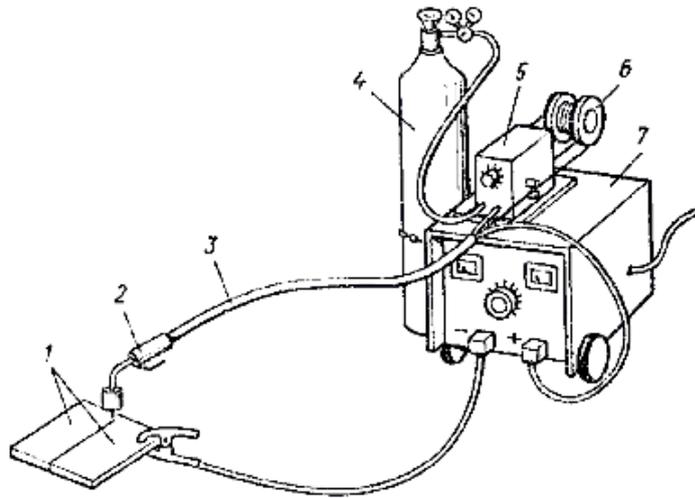


Рис. 5.19. Сварочный пост полуавтоматической дуговой сварки в среде аргона

5.6.1.б. Автоматическая аргонодуговая сварка

В этом случае все операции сварки - зажигание дуги, подача аргона, присадочной и электродной проволоки в зону дуги и перемещение дуги вдоль направления сварки, а также поддержание стабильного горения дуги - осуществляются автоматом, который обслуживает оператор сравнительно невысокой квалификации.

Этим способом можно выполнять сварку неплавящимся электродом без присадки и с присадкой плавящимся электродом. Источник питания дуги имеет напряжение холостого хода 60-80 В, нормальная дуга горит при напряжении 10-12 В. Скорости автоматической сварки плавящимся электродом обычно составляют 15-80 м/час. При автоматической сварке применяют плотности тока в 1,3-1,5 раза выше, чем при полуавтоматической сварке.

Автоматическая сварка плавящимся электродом позволяет получать качественные соединения на стали толщиной 0,5 и более мм, полуавтоматическая - на стали толщиной 1,0 и более мм. Автоматической сваркой выполняют непрерывные швы.

5.6.1.в. Аргонодуговая сварка в камере с контролируемой атмосферой

Сварка производится в герметичной камере, из которой предварительно откачивают атмосферный воздух, а затем заполняют ее аргоном. Сварку выполняют вручную вольфрамовым электродом без присадки или с присадкой или с помощью автомата с дистанционным управлением. Этим способом можно сваривать как мелкие, так и крупногабаритные изделия. Для сварки последних применяют камеры объемом 450-500 м³. Внутри такой камеры успешно можно работать сварщику, снабженному специальной системой дыхания.



5.6.1.г. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества:

1. Возможность сварки легкоокисляющихся металлов (Al, Mg и др.).
2. Возможность сварки в любых пространственных положениях.
3. Возможность визуального наблюдения за процессом формирования шва.
4. Высокое качество сварных соединений, отсутствие шлаковых включений.
5. Концентрированный нагрев обеспечивает получение малой зоны термического влияния и меньшую деформацию изделия.

Недостатки:

1. Дорогой и дефицитный аргон.
2. Дорогое оборудование и вольфрамовые электроды.

Применение:

1. Аргонодуговая сварка является универсальным способом и позволяет сваривать все металлы и сплавы.
2. Способ почти незаменим при сварке алюминия и его сплавов типа АМц, АМг, АЛ5, АЛ10 и др.; магниевых сплавов типа МА8, МА21 и др.; меди М1, М2 и ее сплавов - латуней Л96, Л62, бронз БрБ2 и др.; никеля и его сплавов типа СН1, нихрома и др.; тугоплавких и химически активных металлов - ниобия, тантала, титана, молибдена, циркония и др.
3. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом является одним из лучших способов сварки тонколистовых (от 0,1 до 1,5-2 мм) заготовок алюминиевых, магниевых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей.
4. Аргонодуговую сварку применяют при изготовлении ответственных изделий из специальных легированных сталей.
5. Трудно поддаются сварке дуралюмины. В зоне термического влияния резко снижается прочность, пластичность и коррозионная стойкость, а в металле шва часто образуются трещины.
6. Аргонодуговая сварка из-за дороговизны процесса не применяется при изготовлении изделий из обычных углеродистых сталей.
7. В камере с контролируемой атмосферой сваривают в основном изделия из ниобия, тантала, титана, молибдена и особо ответственных изделий из легких сплавов.

5.6.2. Дуговая сварка в среде углекислого газа

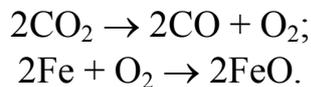
Эту сварку выполняют только плавящимся электродом на повышенных плотностях постоянного тока обратной полярности. Оборудование поста для полуавтоматической сварки в углекислом газе состоит из газоэлектрической горелки, баллона с углекислым газом, газового редуктора для снижения давления газа, сварочного шланга для подачи углекислого газа в горелку, источника питания дуги постоянного тока с внешней возрастающей характеристи-



кой, шкафа управления, механизма подачи сварочной проволоки из кассеты в сварочную горелку. При применении CO_2 газовое оборудование оснащается подогревателем газа и его осушителем. Последние необходимы для предотвращения замерзания редуктора в результате поглощения теплоты при испарении жидкой углекислоты (и превращении ее в газ). Расход газа определяется по расходомеру.

Углекислый газ - бесцветный, со слабым запахом, в 1,2 раза тяжелее воздуха. При температуре $-78\text{ }^\circ\text{C}$ или при небольшом давлении переходит в жидкость. Получают CO_2 из отходящих газов химических производств в сжиженном или твердом состоянии (сухой лед). Выпускают два сорта углекислого газа: для сварки с 999,5 % чистого газа и пищевую углекислоту с 98,5 % CO_2 . Поставляют CO_2 в сжиженном состоянии в стандартных стальных баллонах под давлением 60-70 атм. (6-7 МПа). Баллоны окрашиваются в черный цвет с желтой надписью “ CO_2 сварочный”. В стандартный баллон емкостью 40 литров вмещается 25 кг жидкой углекислоты, которая при испарении дает 12000 дм^3 газа. Расход углекислого газа при сварке зависит от диаметра электродной проволоки и составляет 400-1000 $\text{дм}^3/\text{час}$. Подается CO_2 в горелку под давлением 0,4-0,6 атм.

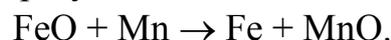
При применении CO_2 в качестве защитного газа необходимо учитывать металлургические особенности процесса сварки, связанные с окислительным действием CO_2 на расплавленный металл. При высоких температурах сварочной дуги CO_2 диссоциирует на окись углерода CO и кислород, который, если не принять специальных мер, приводит к окислению свариваемого металла и легирующих элементов:



CO выделяется в виде пузырьков, ванна начинает “кипеть”, при кристаллизации шва образуются поры.

FeO тяжелее стали и хорошо растворяется в жидкой стали, насыщая сварочную ванну кислородом и снижая механические характеристики наплавленного металла. Для нейтрализации окислительного действия CO_2 в сварочную ванну вводят раскислители: марганец и кремний. С этой целью выпускается специальная сварочная проволока с повышенным содержанием марганца и кремния (например, Св-08ГС и Св-08Г2С).

При введении раскислителей в сварочную ванну “кипение” прекращается. Раскислители, обладая большим сродством к кислороду, нежели железо, восстанавливают его, образуя шлак.



MnO легче жидкой стали, поэтому всплывает на поверхность ванны, образуя ее шлаковую защиту.



Следует помнить, что поры в шве образуются также из-за наличия загрязнений на свариваемых поверхностях (ржавчины, окалины, влаги), а также из-за влаги в CO_2 .

Таким образом, при сварке в углекислом газе происходит насыщение сварочной ванны кислородом (который легко удаляется с помощью раскислителей). Главная же роль CO_2 как защитного газа заключается в защите сварочной ванны от попадания в нее азота воздуха. Азот, в отличие от CO_2 , невозможно удалить из сварочной ванны. Азот образует с железом нитриды, которые приводят к хрупкости сварного шва.

Для полуавтоматической сварки в CO_2 применяют полуавтоматы типа ПДГ-303. Для автоматической сварки в CO_2 используются автоматы тракторного типа АДГ-502 или автомат А-1417. Оба автомата предназначены для выполнения прямолинейных швов значительной протяженности в нижнем положении.

При сварке в CO_2 дуга имеет возрастающую вольт-амперную характеристику, поэтому она будет гореть более устойчиво и лучше саморегулироваться в том случае, если источник питания имеет жесткую или возрастающую внешнюю характеристику. Для повышения устойчивости дуги и уменьшения разбрызгивания следует применять высокую плотность тока, т. е. применять более тонкую сварочную проволоку. При полуавтоматической сварке используют проволоку диаметром 0,8-2 мм. При автоматической сварке в CO_2 применяется проволока диаметром 1,8-3,5 мм. Полуавтоматическую сварку ведут "углом вперед" или "углом назад" (угол наклона горелки от вертикали 5-15°). При сварке "углом вперед" глубина проплавления меньше, валик - шире. Такой метод применяется при сварке тонколистовых сталей.

5.6.2.а. Технико-экономическое обоснование

Преимущества.

Дешевый защитный газ, высокая производительность, способ малочувствителен к наличию на свариваемых поверхностях окалины и ржавчины.

Недостатки.

Повышенное разбрызгивание требует применения противопожарных покрытий околошовной зоны, способ сварки в CO_2 требует специальной легированной сварочной проволоки и специального источника питания постоянного тока. Нельзя сваривать легкоокисляющиеся цветные металлы и высоколегированные стали.

Применение.

Сварка в CO_2 предназначена для соединения обычных углеродистых сталей (Ст1, Ст2, Ст3, 10, 20, 30) и, ограниченно, низколегированных (19Г, 14Г2 и др.). Сварка в CO_2 наиболее эффективна при соединении тонколистовых сталей.

5.7. Газовая сварка

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. 5.20) располагаются на столе, армированном шамотной плиткой, при этом с помощью прижимов 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.

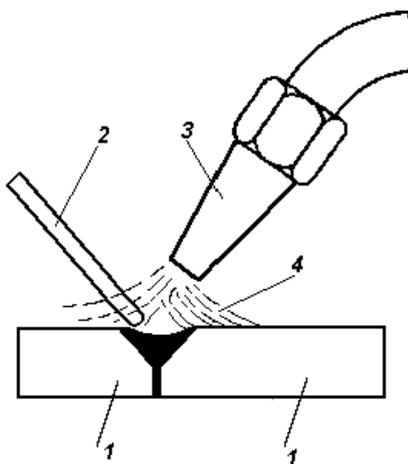


Рис. 5.20. Схема газовой сварки

5.7.1. 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).

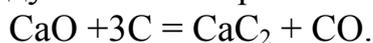
Пример: емкость баллона 40 дм³, давление 150 кгс/см². Количество кислорода в баллоне равно $40 \cdot 150 = 6000$ дм³ (при атмосферном давлении). Зная часовой расход газа при сварке, определяют, на сколько часов работы хватит этого количества газа.

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.

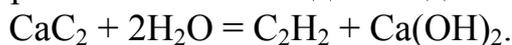
Горючие газы. Основным горючим газом при сварке и резке является *ацетилен* (C₂H₂). Все остальные газы (пропан, природный газ, водород, нефтяные газы, пары бензина или керосина) являются *газами-заменителями*, т. к. ацетилен дает самую высокую температуру пламени (3150-3200 °С).

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:



Количественное соотношение реагентов:

Карбид кальция 1 кг	Вода 0,562 кг	Ацетилен 0,406 кг	Гашеная известь 1,156 кг
------------------------	------------------	----------------------	-----------------------------

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, инфузородной 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.

5.7.2. Оборудование для газовой сварки

Ацетиленовые генераторы (газогенераторы) - это аппараты для разложения карбида кальция водой с целью получения газообразного ацетилена (рис. 5.21).

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 газогенераторе 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.

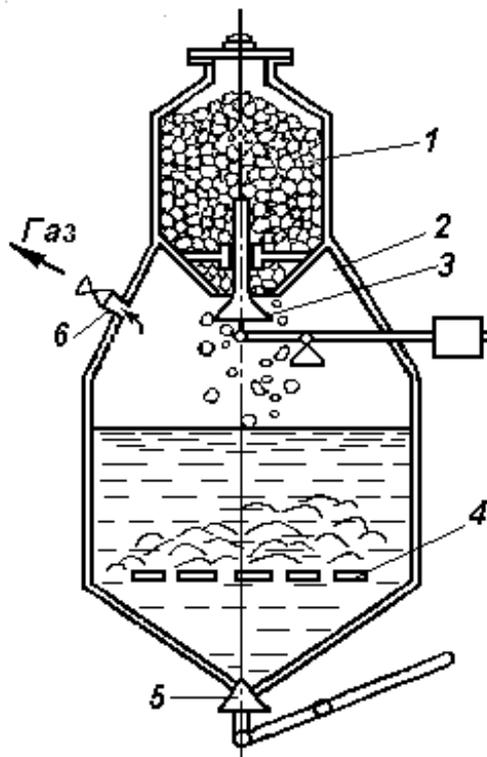


Рис. 5.21. Схема ацетиленового генератора системы “карбид в воду”:
1- бункер, 2 - газообразователь, 3 - питатель, 4 - решетка, 5 - спуск ила,
6 - отбор газа

Сварочные горелки бывают инжекторными и безинжекторными. Наибольшее применение находят *инжекторные горелки*, рис. 5.22, 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.

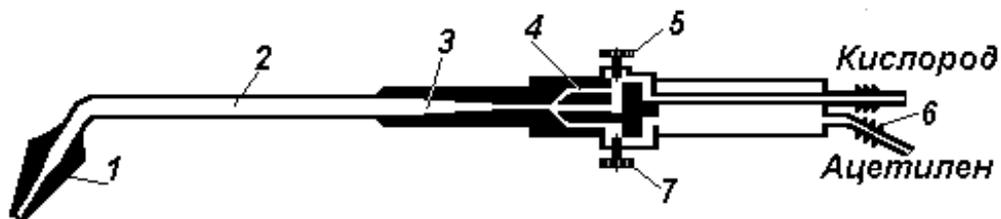


Рис. 5.22. Схема инжекторной горелки

5.7.3. 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. 5.23):

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. 5.23, а). Такое пламя применяют для сварки чугуна, наплавки быстрорежущей стали и твердых сплавов;

окислительное пламя образуется при соотношении $O_2 : C_2H_2 > 1,2$, т. е. при избытке кислорода (рис. 5.23, в). Применяется при сварке латуни.

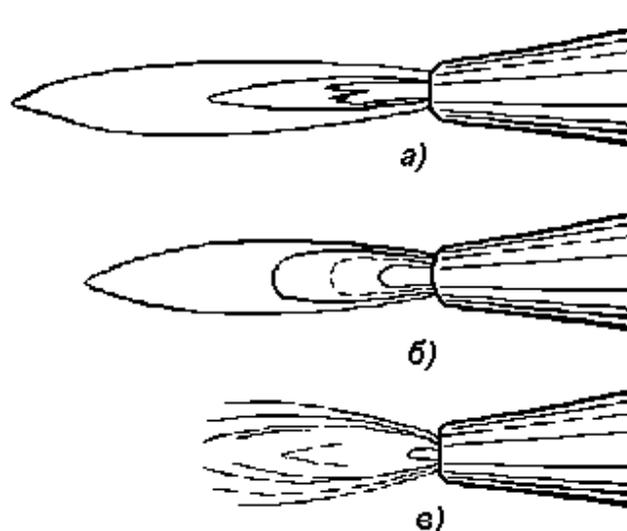


Рис. 5.23. Виды сварочного пламени

Строение нормального пламени представлено на рис. 5.24. 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.

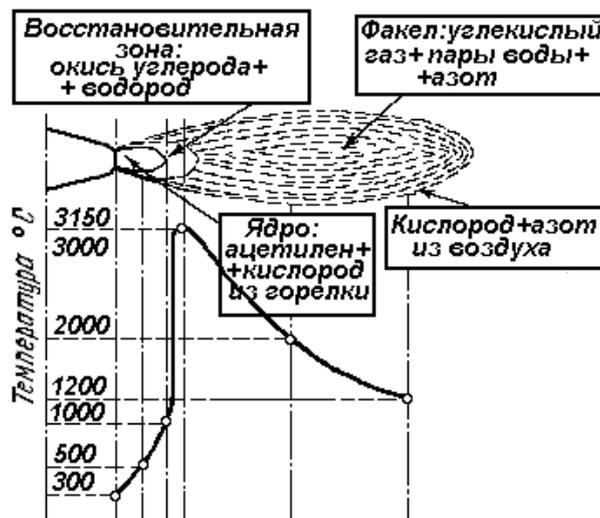


Рис. 5.24. Строение нормального пламени и распределение температур

5.7.4. 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 $S < 10$ мм можно пользоваться формулой:

$$d = 0,5 \cdot S + 1.$$

При толщине $S > 10$ 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. 5.25.

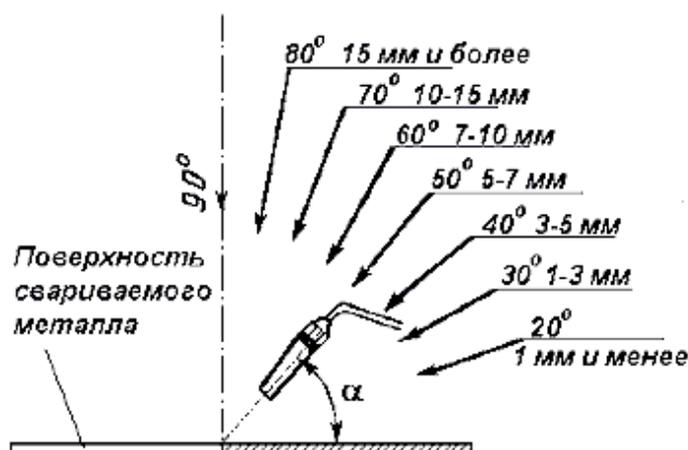


Рис. 5.25. Угол наклона горелки в зависимости от толщины металла заготовок

При увеличении толщины металла нужна большая концентрация тепла и, соответственно, больший угол наклона горелки.

5.7.5. Пост для газовой сварки

Пост для газовой сварки (рис. 5.26) должен иметь: сварочный стол 1, армированный шамотным кирпичом, свариваемые заготовки 2, присадочную сварочную проволоку 3, горелку 4, гибкие сварочные шланги 5, баллон с ацетиленом 8 и редуктором 6 (окрашенным в белый цвет, как и баллон), баллон с кислородом и редуктором 7 (окрашенным в голубой цвет, как и баллон). Каждый редуктор оснащен двумя манометрами: один показывает давление газа в баллоне, другой - давление на выходе (в шланге).

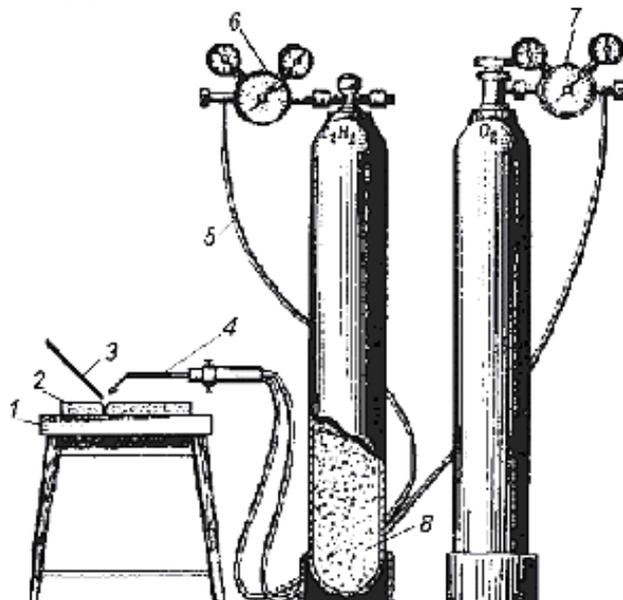


Рис. 5.26. Пост газовой сварки



5.7.6. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества:

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.

Применение:

1. Сварка тонких листов (0,2-2 мм).
2. Ремонт различных машин и механизмов, заварка дефектов в отливках, в том числе из чугуна и бронзы, монтаж и ремонт сантехнических и теплотехнических коммуникаций.
3. Наплавка специальных легированных сталей (жаропрочных, износостойких и др.) на конструкционную сталь.
4. Пайка и резка металлов.

5.8. Газовая ацетилено-кислородная резка металлов

Кислородная резка основана на способности некоторых металлов гореть в струе кислорода при температуре значительно ниже температуры плавления, с выделением тепла. Газовой ацетилено-кислородной резкой можно резать только те металлы, которые удовлетворяют следующим условиям:

1. Температура плавления металла должна быть выше температуры сгорания металла в кислороде. Например, железо имеет температуру плавления 1539 °С, а температура воспламенения чистого порошка железа в кислороде 315 °С. Этому условию не удовлетворяет чугун. У него температура плавления ниже температуры сгорания. По этой причине чугун невозможно разрезать кислородной резкой.

2. Температура плавления окислов металла должна быть ниже температуры плавления металла. Например, этому условию не удовлетворяет алюминий и его сплавы: температура плавления алюминия 660 °С, а образующаяся на поверхности алюминия тугоплавкая пленка Al_2O_3 имеет температуру плавления 2050 °С и препятствует резке и сварке.

Схема ацетилено-кислородного резака представлена на рис. 5.27. Конструкция резака такая же, как и газовой горелки, только резак имеет дополнительно трубку 4 для подачи режущего кислорода. Мундштук 3 состоит из двух мундштуков: для подачи режущего кислорода 2 и горючей смеси 1 для создания подогревательного пламени.

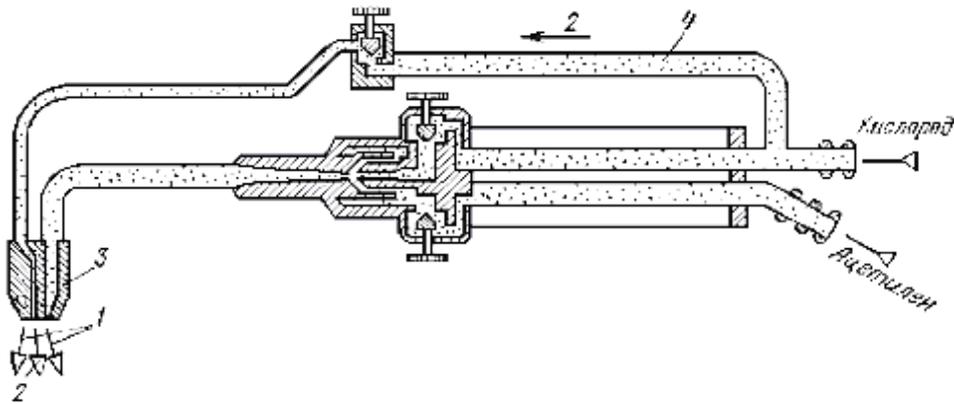


Рис. 5.27. Схема ацетилено-кислородного резака

Шланги применяются с внутренним диаметром 5,5; 9,5 и 13 мм и с наружным диаметром 17,5 или 22 мм. Для горючих газов шланги допускают рабочее давление 3 атм (304 кН/м^2), а для кислорода - 10 атм (1013 кН/м^2). Длина шланга при работе от баллона должна быть не менее 8 м, а при работе от генератора - не менее 10 м.

Газы-заменители ацетилена, применяемые при газовой сварке и резке, менее эффективны, чем ацетилен.

Нефтяной газ - смесь горючих газов, являющихся побочным продуктом нефтеперерабатывающих заводов.

Природный газ получают из газовых месторождений. Он состоит в основном из метана (93-99 %).

Пропан-бутановую смесь получают при добыче и переработке нефтяных газов и нефти. Хранится и транспортируется в сжиженном состоянии в баллонах емкостью 23,33 и 45 кг под давлением 16-17 атм ($1621-1722 \text{ кН/м}^2$). Жидкая смесь заполняет только половину баллона, так как при нагреве значительное повышение давления может привести к взрыву баллона.

Бензин и керосин используют в виде паров. Для этой цели горелки и резаки имеют специальные испарители, которые нагреваются от вспомогательного пламени или электрическим током.

Кислородно-флюсовая резка применяется для резки металлов, которые невозможно разрезать ацетилено-кислородной резкой. При этом способе в зону резки вместе с режущим кислородом вдувается порошкообразный флюс на основе порошка железа и феррофосфора. Для подачи флюса в зону резки резак имеет дополнительную трубку.

При сгорании порошка железа выделяется дополнительное тепло, а главное - флюс образует легкоплавкий жидкотекучий шлак.

Этим способом режут чугун, медь и ее сплавы, алюминий и его сплавы, нержавеющие стали.

Резка кислородным копьём выполняется тонкостенной стальной трубкой (копьём), присоединенной к рукоятке. Применяют газовые трубы диаметром 1/4 дюйма. Кислород проходит через копьё, прижатое свободным концом к прожигаемому металлу. Начинают резку с подогрева края заготовки электрической дугой или газовым пламенем. При подаче кислорода в копьё его конец загорается и дальнейший подогрев не нужен.

Этот способ применяется для резки скрапа большой толщины (до 1200 мм), “козлов” леток сталеплавильных печей, железобетонных плит, отверстий в бетоне. Для повышения термохимического эффекта резки копьём в стальную трубку вставляют проволоку из технического титана. Расплавленный титан и его окислы способны растворять любые огнеупоры.

Резка копьём может быть применена для разборки бетонных плит при катастрофах.

Другие способы огневой резки металлов. Дуговая электрическая резка имеет низкую производительность и качество реза. Воздушно-дуговая резка угольным электродом в настоящее время редко применяется. Плазменно-дуговая резка наиболее перспективна, т. к. обеспечивает чистый рез и высокую производительность.

5.9. Контактная электрическая сварка

Контактная электрическая сварка осуществляется с помощью нагрева и давления. При всех видах контактной сварки металл нагревается за счет выделения тепла при прохождении электрического тока через сварное соединение; количество этого тепла определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t,$$

где I - сварочный ток, А; R - сумма сопротивлений свариваемых участков цепи, Ом; t - время протекания тока, с. Существуют несколько разновидностей электроконтактной сварки.

5.9.1. Электроконтактная стыковая сварка

Стыковая сварка (рис. 5.28) подразделяется на сварку сопротивлением и сварку оплавлением.

При **сварке сопротивлением** торцы заготовок 1 тщательно подгоняют, заготовки закрепляют в захватах 2 сварочной машины, сводят до соприкосновения и включают ток от понижающего трансформатора 3. После нагрева металла в месте контакта до пластического состояния давление сжатия повышают. Этот способ используется для сварки стержней из стали, меди и латуни небольшого диаметра с площадью контакта до 1500-2000 мм².

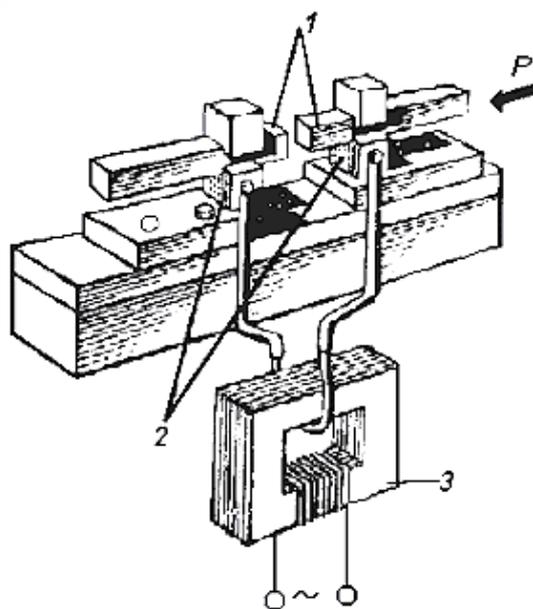


Рис. 5.28. Схема контактной стыковой сварки

Для соединения стержней большого диаметра применяется **сварка оплавлением**. При этом не требуется подгонка кромок. После включения тока заготовки сводят до соприкосновения, и в отдельных местах контакта благодаря высокой плотности тока происходит оплавление. Прилегающий к стыку металл нагревается до пластического состояния, и в этот момент производится его осадка. В процессе осадки с торцов выдавливается жидкий металл, вместе с ним удаляются из шва окислы и загрязнения. Применяют два варианта сварки: непрерывным и прерывистым оплавлением. Сварка *непрерывным* оплавлением описана выше. При *прерывистом* оплавлении зажатые в захватах 2 заготовки сближают под током. Быстро повторяя следующие одно за другим замыкание и размыкание, добиваются оплавления всего сечения. Затем производится осадка, в процессе которой выключается ток.

Метод оплавления имеет ряд преимуществ перед сваркой сопротивлением: поверхность стыка не требует особой подготовки, можно сваривать различные металлы (быстрорежущую и углеродистую сталь, медь и алюминий). Удельное давление осадки составляет 3-6 кгс/мм² (39-59 МН/м²). Плотность тока принимается для сталей 20-60 А/мм². Припуск на сварку составляет приблизительно 60 % от диаметра, напряжение 5-15 В, время 2-20 с.

Машины для стыковой сварки в основном стационарные. В машинах с ручным приводом сжатие заготовок и осадка осуществляются вручную. Качество сварки зависит от оператора. В машинах автоматического действия все операции выполняют автомат. Привод в автоматах пневматический или гидравлический. Стыковые машины сокращенно обозначают: МСР-25, МСГА-300.

Параметрами **режима** стыковой сварки являются *плотность тока, давление и время сварки*. В отличие от точечной и шовной сварки, время

протекания сварочного тока определяется косвенно через величину осадки, которая зависит от установочной длины. *Установочной длиной* называется расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки; оно зависит от свойств металла и размеров заготовки. Установочную длину выбирают по специальным таблицам или экспериментально.

Преимущества.

Высокая производительность процесса сварки, легкость автоматизации процесса, не требуются сварочные материалы.

Недостатки.

Требуется специальное дорогое оборудование.

Применение.

Для сварки стержней арматуры, заготовок рукоятей, валов и т. п. в машиностроении.

Способ незаменим в производстве сверл большого сечения.

5.9.2. Точечная электроконтактная сварка

При *точечной сварке* листы сваривают между собой не по всей поверхности касания, а лишь в отдельных точках (рис. 5.29).

Сущность процесса: тщательно зачищенные листы 2 накладывают друг на друга внахлестку и помещают между двумя медными, охлаждаемыми водой, электродами 3, подключенными ко вторичному витку понижающего трансформатора 4. Верхний хобот 1 сварочной машины может перемещаться в вертикальном направлении, а нижний - неподвижный.

Затем листы сжимают между электродами с усилием P , после чего кратковременно включают сварочный ток большой силы, который доводит металл в месте контакта до плавления ядра 5 и до пластического состояния зоны 6.

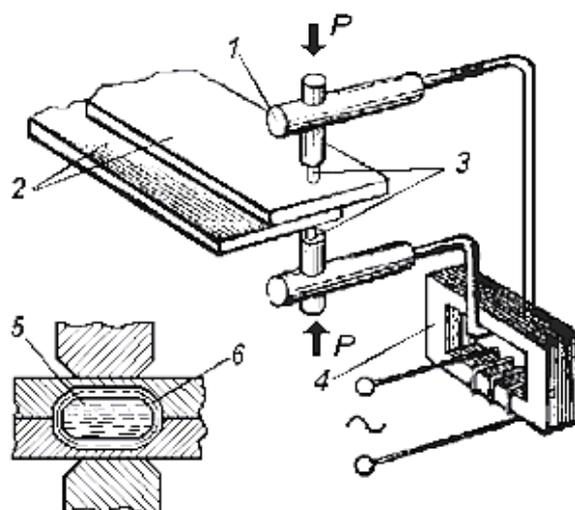


Рис. 5.29. Схема контактной точечной сварки

Затем ток автоматически выключается, жидкая ванна металла (ядро сварной точки) затвердевает под действием усилия P , что предупреждает образование усадочной раковины.

Точечная сварка может производиться на мягких и жестких режимах. **Мягкие режимы** характеризуются большой продолжительностью протекания тока в сварочной цепи (плавным нагревом) и меньшей его плотностью: плотность тока $80-150 \text{ А/мм}^2$, усилие на электродах $15-40 \text{ МН/м}^2$, время протекания тока $0,5-3 \text{ с}$. В этом случае возникает более обширная зона термического влияния. На таких режимах сваривают углеродистые, низколегированные стали и стали, склонные к закалке.

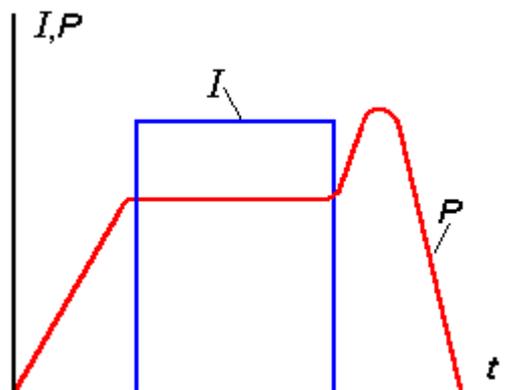


Рис. 5.30. Циклограмма контактной точечной сварки

Жесткие режимы характеризуются очень малой длительностью протекания тока и большой его плотностью: плотность тока $120-360 \text{ А/мм}^2$; время $0,001-0,01 \text{ с}$. На этих режимах сваривают листы малой толщины ($0,1-1,0 \text{ мм}$), особенно из нержавеющей и жаропрочных сталей, а также металлы с высокой электро- и теплопроводностью, не допускающие перегрева околошовной зоны (Al, Mg, Cu и их сплавы). Режим точечной сварки выбирается по соответствующим нормативным (справочным) данным и задается в виде циклограмм (рис. 5.30).

5.9.2.а. Оборудование для точечной электроконтактной сварки

В настоящее время широко применяют специализированные точечные машины-агрегаты, снабженные роботами. Они обычно входят в состав автоматических линий (например, линий по сварке кузовов автомобилей). Точечные переносные машины (“клещи”) изготавливают только автоматического действия, часто снабженными роботами. Они выполняют сварку на переменном токе. Существуют также машины, выполняющие сварку на постоянном токе. Их называют точечными машинами с импульсом постоянного тока и обозначают сокращенно МТИП-300-1, МТИП-450-3, МТИП-600-5. Эти машины используют, главным образом, для сварки легких сплавов алюминия и магния.

5.9.2.б. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества.

Это один из самых высокопроизводительных способов сварки. Не требуется высокая квалификация сварщика. Не нужны сварочные материалы.

Недостатки.

Дорогое оборудование, сложные автоматы и роботы, сварка ограничена только листовыми нахлесточными швами. Ширина изделий ограничивается вылетом хобота.

Применение.

Точечная сварка применяется в вагоностроении, в самолетостроении, в приборостроении, в судостроении и сельхозмашиностроении, в строительстве и т. д. Незаменима точечная сварка при изготовлении кузовов легковых автомобилей, кабин тракторов и грузовых автомобилей.

С помощью точечной сварки свариваются практически все металлы и их сплавы: легированные стали толщиной до 10 + 10 мм; нержавеющие стали толщиной до 8 + 8 мм; сплавы алюминия АМц, АМг, Д1, Д16, Д20 и др. толщиной до 8 + 8 мм; сплавы магния (МА1, МА8, МА21 и др.) толщиной до 8 + 8 мм; медь и ее сплавы (Л96, Л90, Л68 и др.) толщиной до 6 + 6 мм; титан и его сплавы (ОТ-4, ОТ4-1, ВТ16) толщиной до 8 + 8 мм. Можно сваривать в пакете от двух до пяти листов. Особенно выгодно применять точечную сварку при замене клепаных и резьбовых соединений.

5.9.3. Шовная (роликовая) электроконтактная сварка

Сущность *роликовой сварки* (рис. 5.31) заключается в том, что свариваемые листы 2 пропускаются между роликами 1 (электродами) сварочной машины. При этом образуется сварной шов, состоящий из отдельных сварных точек, частично перекрывающих друг друга. Электроды подключаются ко вторичной обмотке, которая состоит из одного витка. Понижающий трансформатор 3 рассчитан на получение напряжения 2-12 В, сварочный ток может составлять тысячи ампер.

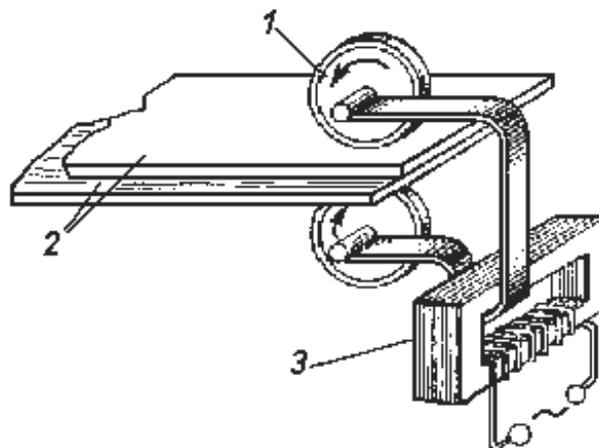


Рис. 5.31. Схема контактной шовной сварки

Различают две основных разновидности шовной сварки:

1. *С непрерывным включением сварочного тока* и непрерывным движением заготовок (рис. 5.32, а).
2. *С прерывистым включением тока* и непрерывным перемещением заготовок (рис. 5.32, б).

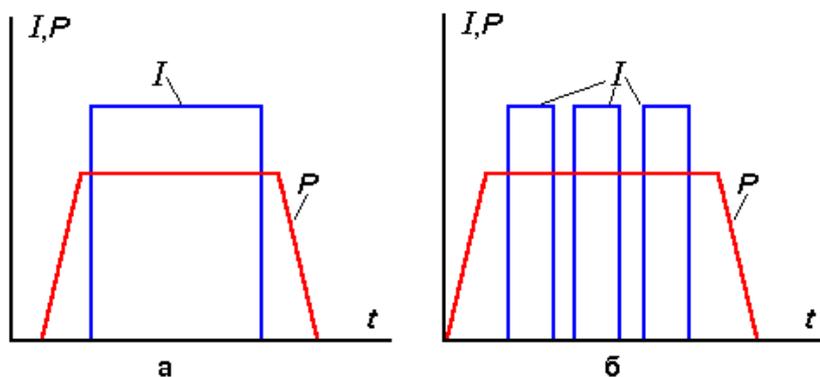


Рис. 5.32. Циклограммы контактной шовной сварки

Первый цикл предназначен для сварки коротких швов. Второй цикл - для сварки длинных швов и сварки металлов, для которых опасен перегрев.

Короткие швы сваривают от одного конца заготовки к другому, а длинные - от середины к концам.

Параметрами **режима** шовной сварки являются *плотность тока* (до 4000 А/мм²); *давление* (достигает 7 МН/м²); *время протекания тока* - до 0,3 с; *время отключения тока* (паузы) - до 0,7 с; *скорость сварки* 0,5-3 м/мин.

Шовные машины бывают переносные и стационарные, специализированные и универсальные, полуавтоматического (педального) и автоматического действия, имеющие пневматический механизм сжатия роликов. Диаметр роликов равен 40-350 мм. Педальные машины выполняют сварку на переменном токе (типа МШП). Автоматические машины - на переменном токе или на постоянном (с импульсом постоянного тока), типа МШШИ.

5.9.3.а. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества.

Шовные машины могут производить как прерывистую сварку, так и сплошным швом. Обеспечивают высокую герметичность и хороший внешний вид шва. Не требуется высокая квалификация сварщика.

Недостатки.

Сложное оборудование. Особенно сложна конструкция узла токоподвода к вращающимся роликам-электродам. При сварке герметичных швов требуется подготовка в виде отбортовки.

Применение.

Шовная сварка применяется в массовом производстве при изготовлении топливных баков и других сосудов из сталей и цветных металлов, а так-

же из стальных листов с покрытием (оцинкованные, луженые, освинцованные и др.).

Шовной сваркой сваривают листы толщиной от 0,3 до 3 мм.

Ролико-стыковая сварка труб с продольным сварным швом является разновидностью шовной электроконтактной сварки.

5.9.4. Конденсаторная сварка

Сущность этого способа контактной сварки состоит в том, что необходимая для сварки энергия накапливается в конденсаторе К (рис. 5.33), работающем от выпрямителя В, а затем через трансформатор Т разряжается на свариваемые заготовки. Существуют *бестрансформаторная* конденсаторная сварка (применяется для сварки проволоки малого диаметра) и *трансформаторная*, с помощью которой можно производить точечную сварку.

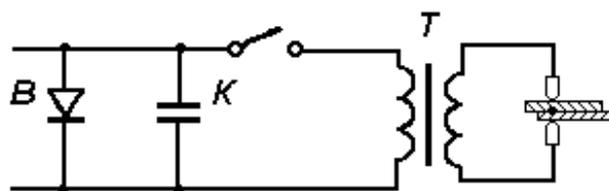


Рис. 5.33. Схема конденсаторной сварки

Преимуществом конденсаторной сварки является малая потребляемая мощность. Такую установку можно включать в осветительную сеть, т. к. некоторые машины имеют мощность не более мощности обычной настольной лампы.

5.10. Специальные виды сварки

5.10.1. Плазменная сварка

Существует четыре агрегатных состояния вещества - твердое, жидкое, газообразное и плазменное.

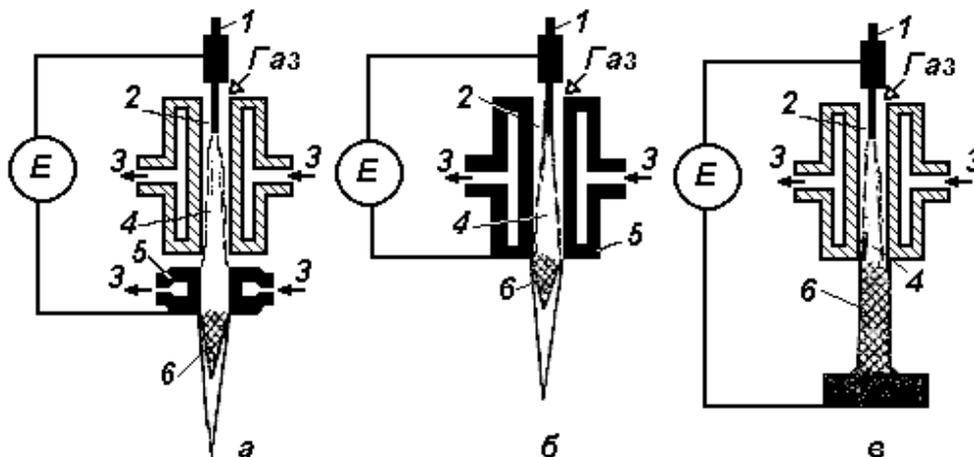


Рис. 5.34. Схемы дуговых плазменных головок

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.

Плазменную струю получают с помощью плазменной горелки (*плазмотрона*), рис. 5.34. 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. 5.34, 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 отдельным соплом и каналом*, со струей, выделенной из столба дуги (*струя косвенного действия*), рис. 5.34, а; *с совмещенным соплом и каналом*, со струей, выделенной из столба дуги (струя косвенного действия), рис. 5.34, б; *с совмещенным соплом и каналом*, со струей, совпадающей с токоведущим столбом дуги (*струя прямого действия*), рис. 5.34, 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.

5.10.1.а. 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.

5.10.1.б. Технико-экономическое обоснование

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, нанесение жаростойких и коррозионностойких защитных покрытий.

Плазменной струей можно испарять материалы. Конденсацией паров материалов, выходящих из плазменной струи, получают монокристаллы по-

лупроводниковых материалов и чистых металлов, таких, как вольфрам, молибден, ниобий и др. Плазменную струю можно использовать для получения тонких металлических нитей очень высокой прочности.

5.10.2. Электронно-лучевая сварка

При *электронно-лучевой сварке* нагрев металла производится *электронным лучом* - сжатым потоком электронов, быстро перемещающимся в сильном электрическом поле.

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. 5.35.

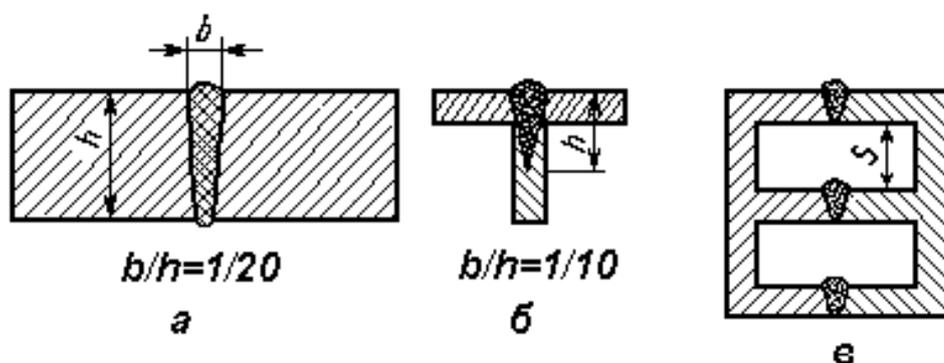


Рис. 5.35. Типы сварных соединений, выполняемых электронно-лучевой сваркой

Отношение глубины проплавления h к ширине шва b может достигать 20:1; такое проплавление называется *кинжальным*, рис. 5.35, 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 околошовной 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.

5.10.2.а. Оборудование

Установка для электронно-лучевой сварки состоит из вакуумной камеры, в которой поддерживается в процессе сварки вакуум 10^{-4} - 10^{-5} мм рт. ст. ($133 \cdot 10^{-4}$ - $133 \cdot 10^{-5}$ Н/м²), и *электронной пушки* - генератора электронного луча (рис. 5.36).

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 юстировочных 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.

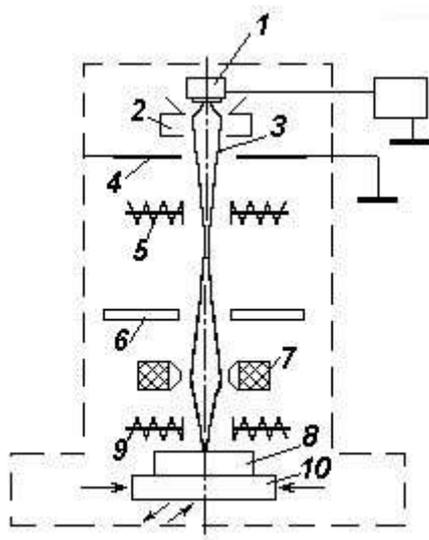


Рис. 5.36. Схема электронно-лучевой сварки

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 называемое ускоряющее напряжение) различают два типа электронно-лучевых 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.

5.10.2.б. Техничко-экономическое обоснование

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. 5.35, 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.

Применение. Для сварки всех материалов, в том числе разнородных, например, металлов с керамикой, стеклом; особенно высокое качество обеспечивается при сварке тугоплавких и химически активных металлов: ниобия, тантала, молибдена, вольфрама, титана, циркония и др.; минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм.

С помощью электронного луча, кроме процесса сварки, можно успешно прошивать отверстия диаметром тоньше человеческого волоса, прорезать очень узкие пазы, щели, разрезать на части заготовки, особенно из драгоценных металлов, а также неметаллов (кварц, керамика, алмазы и др.). Края обработанной поверхности получаются ровные и чистые, не требующие доводки, а структура смежных слоев металла при этом остается неизменной.

5.10.3. Сварка трением

Сварка трением происходит в твердом состоянии. При этом торцы свариваемых стержней сводятся до соприкосновения (рис. 5.37, а). Затем один из стержней приводится во вращение и сдавливается со вторым силой P . За счет трения выделяется тепло, и свариваемые поверхности разогреваются до пластического состояния. При этом разрушаются окисные пленки. Этот период называется *осадка*. Затем вращение мгновенно прекращается, усилие сдавливания увеличивается (*проковка*), и возникает сварное соединение за счет сил межзатомного взаимодействия. Иногда для сварки достаточно одной осадки, без проковки.

Основными параметрами **режима сварки** являются: удельное давление $P=10-20$ кгс/мм², время $t=3-10$ с; величина осадки 2-10 мм, скорость вращения V - до 3000 об/мин.

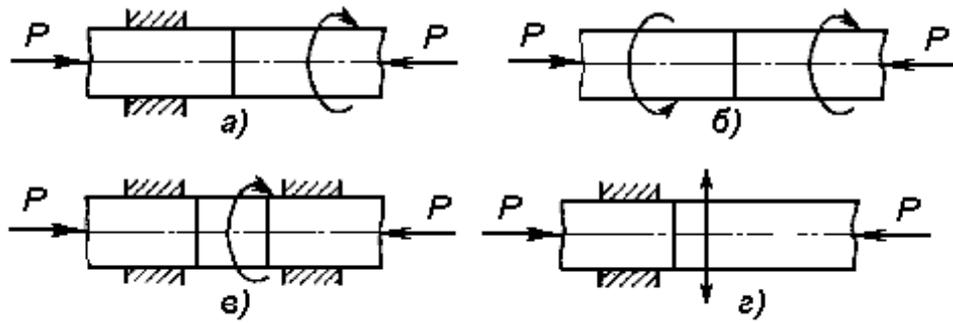


Рис. 5.37. Принципиальные схемы сварки трением

В производстве нашли применение сварочные машины, изготовленные по схеме рис. 5.37, а. Остальные схемы имеют ограниченное применение или вообще не применяются из-за сложности механизма осуществления схемы. Самым ответственным и быстро выходящим из строя является узел мгновенного торможения, от которого в основном и зависит качество сварки.

Существуют разные типы сварных соединений, которые могут быть осуществлены по двум схемам: 1) **сварка встык стержней и труб** (рис. 5.38, а, б) или сварка трубы со стержнем (рис. 5.38, в) и 2) **сварка стержня или трубы с листом** (рис. 5.38, г, д, е). При этом для сварки стержня с листом необходимо, чтобы лист имел выступ по размеру стержня.

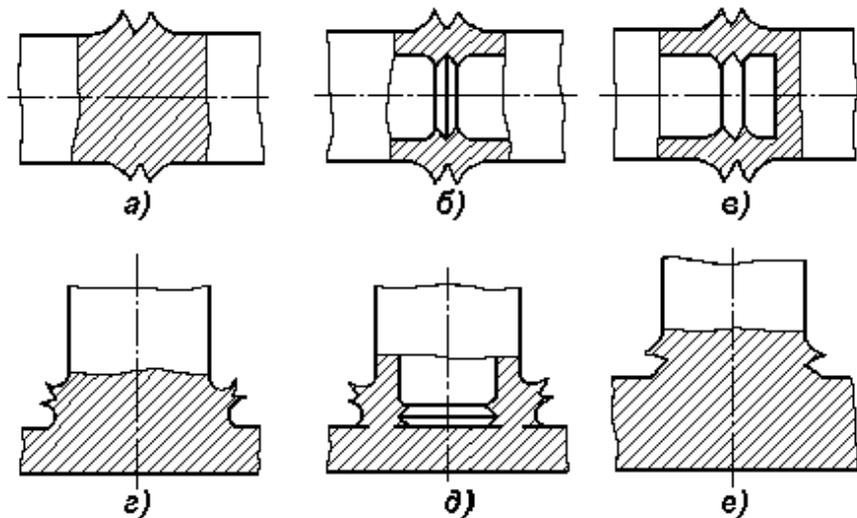


Рис. 5.38. Типы сварных соединений, выполняемых сваркой трением

5.10.3.а. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества. При сварке трением расходуется в 5-10 раз меньше электроэнергии, чем при контактной сварке. Нет разбрызгивания жидкого металла и искр, как при контактной электросварке.

Недостатки. Дорогое оборудование, необходимость иметь сжатый воздух (4-6 атм) для сдавливания заготовок или гидросистему, что еще хуже. Быстрый износ и требование частой регулировки тормозных узлов.

Применение. Широко применяется сварка трением в инструментальной промышленности для изготовления сверл, фрез, метчиков и т. п. При этом заготовки диаметром от 8 до 35 мм сваривают сваркой трением, а заготовки большего диаметра - электроконтактной сваркой.

В машиностроении сваривают рукоятки, валы, штоки, пуансоны и т. п. При сварке разнородных металлов требуется специальная оправка для формирования сварного соединения.

5.10.4. Холодная сварка

Холодная сварка осуществляется без нагрева при нормальных и даже при отрицательных температурах. Холодной сваркой свариваются только пластичные металлы.

Сущность процесса заключается в том, что под действием сжимающих усилий (выше предела текучести) металл пластически деформируется, при этом разрушаются окисные пленки и свариваемые поверхности сближаются на расстояние действия межатомных сил. При этом происходит диффузионный обмен электронов внешних орбит атомов соединяемых металлов и образование сварного соединения.

Принципиальная схема холодной сварки представлена на рис. 5.39.

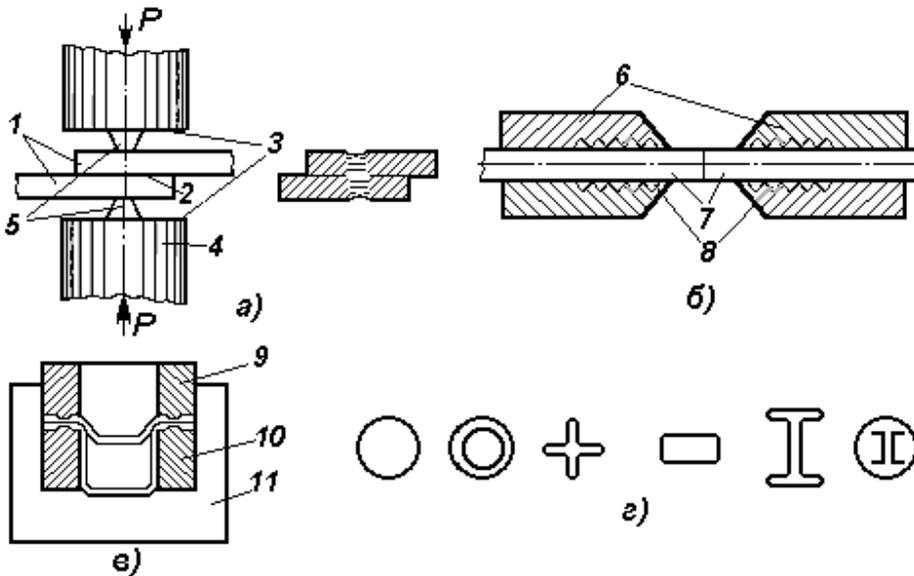


Рис. 5.39. Принципиальная схема холодной сварки

Свариваемые заготовки 1 с тщательно зачищенной поверхностью 2 помещают между пуансонами 4, имеющими выступы 5. При сжатии пуансонов усилием P выступы вдавливаются в металл, пока опорные поверхности 3

пуансонов не упрутся в наружную поверхность свариваемых заготовок (рис. 5.39, а). Форма сварной точки зависит от формы выступов (рис. 5.39, г).

Холодной сваркой можно выполнять *точечные, стыковые* и *шовные* соединения.

При холодной стыковой сварке соединяемые стержни 7 зажимаются губками 6 с насечкой 8 для увеличения трения и сдавливаются (рис. 5.39, б).

Для холодной шовной сварки применяют специальные ролики или получают соединение путем одновременного сдавливания по контуру. При этом пуансоны 9 и 10 строго центрируются с помощью корпуса 11 (рис. 5.39, в).

5.10.4.а. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества. Простота процесса и оборудования. Возможность сварки в полевых условиях, не нужны источники нагрева.

Недостатки. Ограниченность мощности и величины сварных заготовок. Требуется специальное оборудование. Возможность сварки только пластичных металлов.

Применение. Холодной сваркой сваривают алюминий, медь, свинец, никель, золото, серебро и их сплавы; однородные и разнородные металлы в приборостроении, при изготовлении бытовых приборов, в электромонтажном производстве. Для сварки медных и алюминиевых проводов существуют переносные рычажные клещи.

5.10.5. Диффузионная сварка в вакууме

При *диффузионной сварке* соединение образуется в результате взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии. Температура нагрева берется на уровне температуры рекристаллизации. При сварке разнородных металлов температура нагрева берется не выше температуры рекристаллизации более легкоплавкого металла.

Диффузионную сварку в большинстве случаев выполняют в вакууме, однако она возможна и в аргоне.

Перед сваркой, рис. 5.40, заготовки 3 тщательно зачищают, помещают в вакуумную камеру 2 (вакуум $133 \cdot 10^{-3}$ - $133 \cdot 10^{-5}$ Н/м²), сдавливают с помощью механического груза 1 (или гидроустройства) и нагревают высокочастотным индуктором 4 до температуры рекристаллизации. Сжимающее усилие составляет 1-20 МН/м² и воздействует на заготовки в течение 10-30 мин.

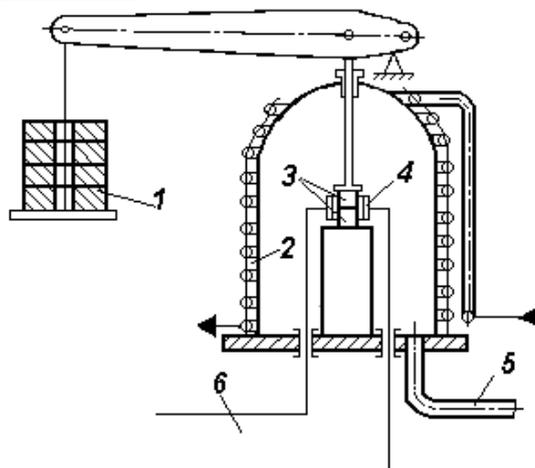


Рис. 5.40. Схема диффузионной сварки в вакууме

Все вводы в камеру (5 - к вакуумному насосу, 6 - к высокочастотному генератору) хорошо герметизируются. Вакуум способствует удалению со свариваемых поверхностей загрязнений и окисных пленок. При взаимной диффузии образуется промежуточный слой, который увеличивает прочность сварного соединения. При сварке однородных материалов границу соединения можно рассмотреть только в микроскоп. При сварке разнородных материалов, не обладающих взаимной растворимостью, в месте стыка образуется хрупкая прослойка интерметаллических соединений. В этом случае подбирают прослойку из металла, который способен образовывать твердые растворы со свариваемой парой.

5.10.5.а. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества. При диффузионной сварке не требуется высокий нагрев до расплавления, а только до температуры рекристаллизации. По этой причине отсутствуют термические деформации. Не требуются флюсы, присадочная проволока. Можно сваривать различные композиции материалов.

Недостатки. Одним из недостатков этого способа является низкая прочность сварного соединения. Размер свариваемых изделий ограничивается размерами вакуумной камеры. Ограничена геометрия сварных соединений.

Применение. Применяется диффузионная сварка в радиоэлектронике и электронной технике, в приборостроении. Этим способом можно сваривать трудносвариваемые металлы: вольфрам, молибден, чугун, твердые сплавы, а также стекло с металлами. Можно получать многослойные изделия.

5.10.6. Ультразвуковая сварка

При *ультразвуковой сварке* используются давление и вибрации при взаимном трении свариваемых поверхностей. Силы трения возникают в результате действия на заготовки механических колебаний с ультразвуковой частотой 15-30 кГц. Для получения механических колебаний высокой частоты

ты используется магнитоstrictionный эффект, рис. 5.41. Этот эффект заключается в изменении размеров некоторых металлов и сплавов под действием переменного магнитного поля.

Свариваемые заготовки 5 размещаются на опоре 6. Наконечник 4 присоединен к рабочему инструменту 3 и вместе с трансформатором продольных колебаний 2 представляет волновод. Волновод присоединен к магнитоstrictionному вибратору 1 с катушкой. Переменный ток от высокочастотного генератора, проходя по обмотке катушки, возбуждает в ней переменное магнитное поле, под действием которого вибратор 1 изменяет свои размеры. Эти колебания (расширение и сжатие) передаются волноводу, который увеличивает их амплитуду с 1-3 мкм до десятков мкм на наконечнике 4.

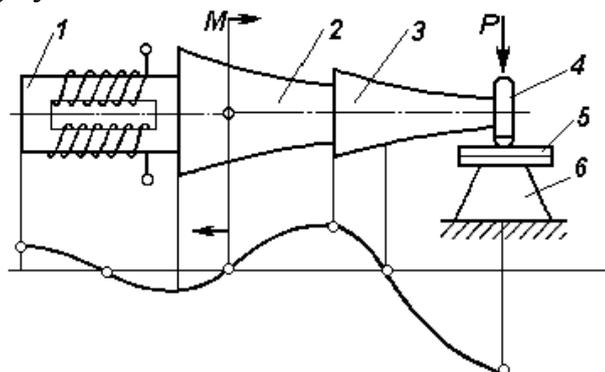


Рис. 5.41. Схема ультразвуковой сварки

В результате ультразвуковых колебаний в тонких слоях контактирующих поверхностей разрушаются поверхностные пленки, слои металла нагреваются и пластически деформируются. При сближении свариваемых поверхностей на расстояние действия межатомных сил между ними возникает прочная связь.

5.10.6.а. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества. Низкие температуры нагрева при ультразвуковой сварке (меди до 600 °С, алюминия до 200-300 °С) позволяют избежать изменений структуры в зоне термического влияния и образования сварных деформаций. Не требуются сварочные материалы и высокая квалификация сварщика.

Недостатки. Малая мощность. Поэтому можно сваривать листы толщиной до 1 мм.

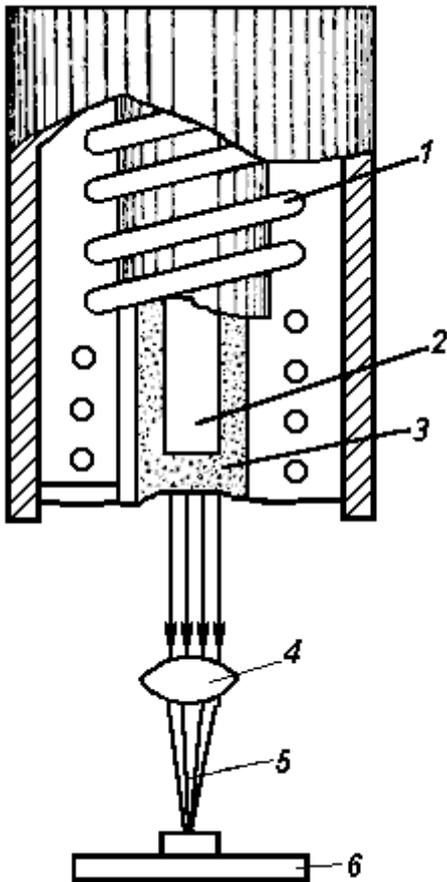
Применение. Ультразвуковая сварка применяется для получения точечных и шовных соединений внахлестку. Можно сваривать металлы в однородных и разнородных сочетаниях. Успешно можно приварить тонкие листы и фольгу к заготовке неограниченной толщины.

5.10.7. Сварка лазерным лучом

Для *лазерной сварки* и других видов обработки материалов применяют оптические квантовые генераторы - *лазеры*, дающие световые лучи с высо-

кой плотностью энергии. Квантовые генераторы преобразуют электрическую, световую, тепловую или химическую энергию в излучение электромагнитных волн: видимого (лазеры), инфракрасного (*мазеры*) или ультрафиолетового диапазона.

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 Al_2O_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. 5.42). Для визуального наблюдения за процессом сварки служит стереосканический микроскоп. Очень важной является защита глаз оператора от излучения. Для этого в микроскоп встроены затвор.

Рис. 5.42. Схема сварки лазерным лучом

5.10.7.а. Техничко-экономическое обоснование

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 микроплатах, 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.

5.10.8. Сварка взрывом

При **сварке взрывом** используется энергия направленного (*кумулятивного*) взрыва.

Сварка взрывом мгновенно соединяет поверхности двух заготовок, например, пластин 4 и 3 (рис. 5. 43).

Одна из пластин неподвижна и является основанием. Вторая - подвижная - располагается под углом α , на расстоянии h_0 . На заготовку 3 кладут взрывчатое вещество 2 толщиной H , а на краю пластины над вершиной угла α устанавливают детонатор 1. Сварка производится на жесткой опоре. В результате взрыва расположенной под зарядом пластине 3 сообщается импульс.

Пластина 3 метается со скоростью 1000 м/с на поверхность неподвижной пластины. В месте контакта метаемой пластины с основанием образуется угол γ , который перемещается вдоль соединяемых поверхностей. При соударении пластин из вершины угла γ кумулятивной струей выдуваются окисные пленки и другие загрязнения. Поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил, и происходит схватывание по всей площади

соединения. В зоне соударения металл течет подобно жидкости и образует сварное соединение в виде волн.

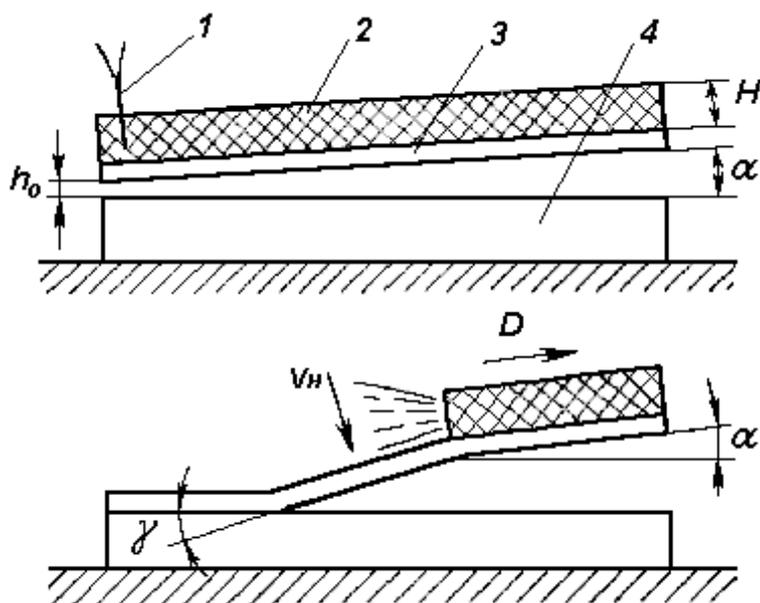


Рис. 5.43. Схема сварки взрывом

Параметрами **режима сварки** являются: *скорость детонации D , нормальная скорость v_n метаемой пластины и угол γ встречи пластин при соударении*. Вес заряда берется равным 1,0-2,0 % массы метаемой пластины, угол γ составляет 2-16°. Взрывчатое вещество - аммонал, тол, гексоген и др.

5.10.8.а. Техничко-экономическое обоснование

Преимущества. Быстрота процесса; возможность применения в труднодоступных местах конструкции. Сварной шов имеет более высокую прочность по сравнению со свариваемым металлом, так как во время сварки подвергается упрочнению.

Недостатки. Сварка взрывом является опасным процессом, требующим специального полигона вне населенного пункта, хранение взрывчатых веществ требует особых условий безопасности.

Применение. Для получения биметаллических пластин высокой прочности. Используется сварка взрывом в сочетании со штамповкой.

5.11. Виды сварных швов

По **расположению швов в пространстве** различают швы: *нижние* (рис. 5.44, а), *горизонтальные* (рис. 5.44, б), *вертикальные* (рис. 5.44, в), *потолочные* (рис. 5.44, г).

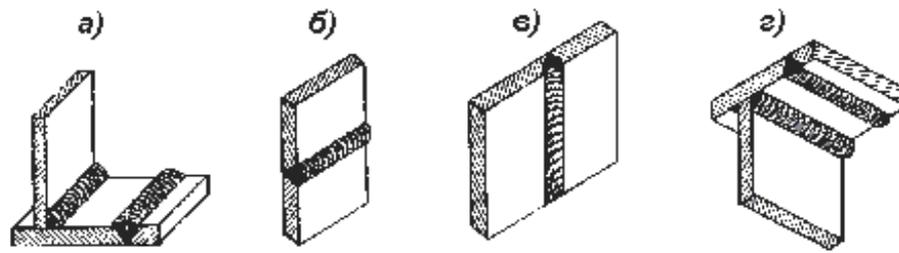


Рис. 5.44. Расположение шва в пространстве

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. 5.45, а), *угловые* (рис. 5.45, б), *тавровые* (рис. 5.45, в), *нахлесточные* (рис. 5.45, г).

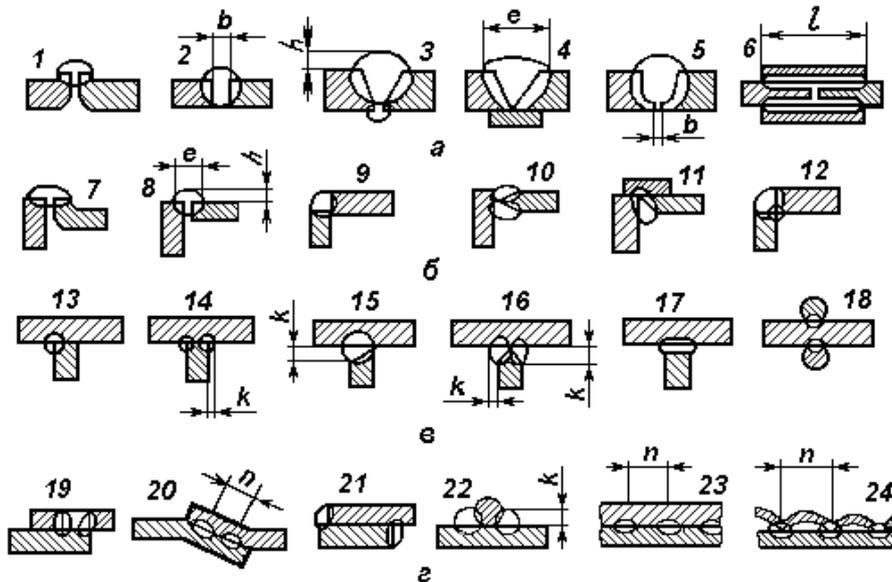


Рис. 5.45. Виды сварных соединений

В зависимости от *положения относительно действия внешних сил* швы разделяются на *фланговые* 1, *лобовые* 2, *косые* 3 (рис. 5.46).

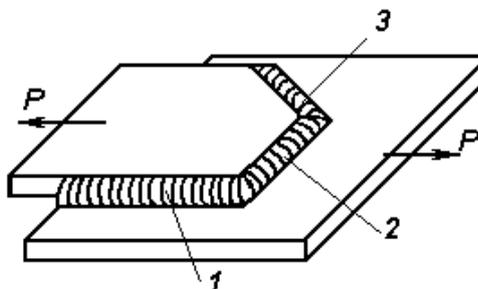


Рис. 5.46. Типы швов в зависимости от их положения относительно действия внешних сил

5.12. Деформации и напряжения при сварке и меры их предупреждения

Основными причинами образования деформаций и напряжений при сварке являются неравномерный нагрев сварной конструкции и усадка наплавленного металла. Различные металлы имеют разную усадку, измеряемую в процентах от первоначального линейного размера: алюминий 1,7-1,8 %; бронза 1,45-1,6 %; латунь 2,06 %; медь 2,1 %; сталь низкоуглеродистая 2,0 %.

Для уменьшения деформаций и напряжений при сварке нужно руководствоваться следующими рекомендациями.

1. Применять марки электродов, повышающие пластичность металла шва.
2. Выполнять швы с меньшим количеством наплавленного металла.
3. Избегать в конструкциях пересекающихся швов, особенно работающих с ударными нагрузками.
4. Ограничивать применение накладок и косынок.
5. Применять по возможности стыковые швы, т. к. они обеспечивают наименьшую концентрацию напряжений.
6. Использовать методы секционного изготовления конструкций.
7. Правильно выбирать тепловой режим при сварке. При сварке закаливаемых сталей применять предварительный, сопутствующий и послесварочный подогрев. Температура подогрева для сталей 400-600 °С, для чугуна - 500-800 °С; для алюминия - 200-270 °С, для бронзы - 300-400 °С. Сварку при отрицательных температурах ведут при низкотемпературном нагреве до 100-300 °С.
8. Применять *метод обратных деформаций* (рис. 5.47, а, б).
9. Применять *метод предварительных смещений* (рис. 5.48, 5.49).

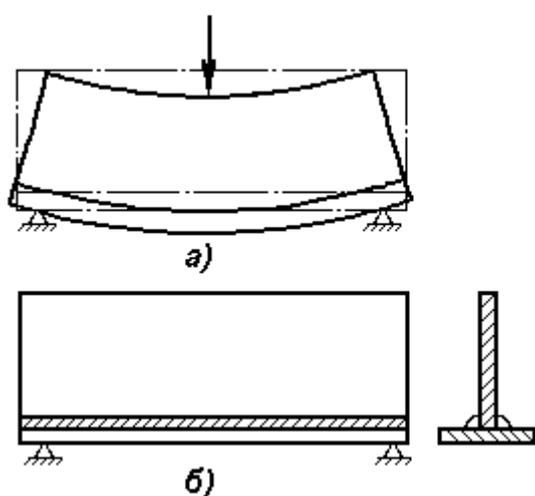


Рис. 5.47. Метод обратных деформаций

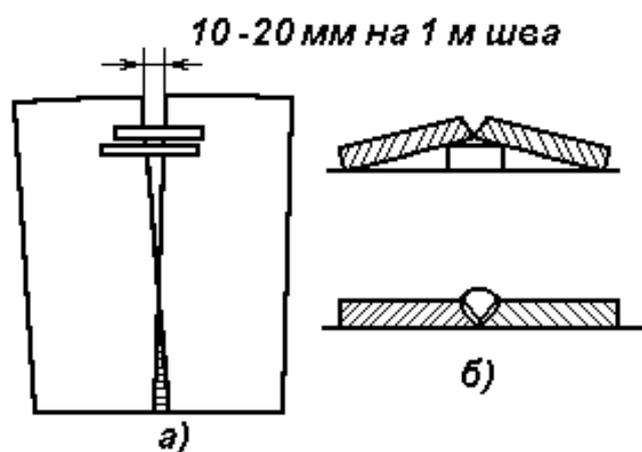


Рис. 5.48. Метод предварительного смещения

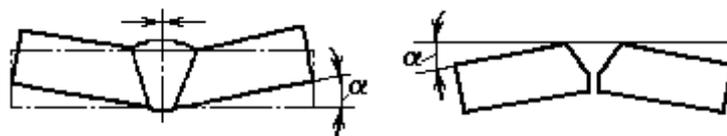


Рис. 5.49. Вариант метода предварительного смещения

10. С целью уменьшения коробления листов швы длиной более 600 мм выполнять в *обратно-ступенчатом порядке* (рис. 5.50). Чем короче шов, тем меньше деформируется изделие.



Рис. 5.50. Обратно-ступенчатый порядок наложения швов

11. Соблюдать *правильную последовательность наложения швов* таким образом, чтобы последующий шов вызывал деформацию, обратную образованной от предыдущего шва, например, при сварке двутавровой балки (рис. 5.51).

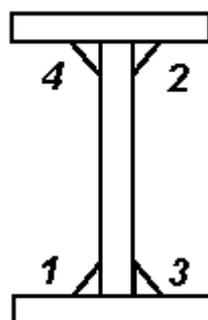


Рис. 5.51. Уравновешивание деформаций

12. Предусматривать *свободную усадку шва* (рис. 5.52).

13. Сваривать швы можно напроход при длине не более 300 мм или *от середины шва к его концам* при длине до 600 мм. В этом случае в середине шва возникают напряжения сжатия. Если производить сварку от концов шва

к середине, возникают напряжения растяжения, отчего могут образоваться трещины.

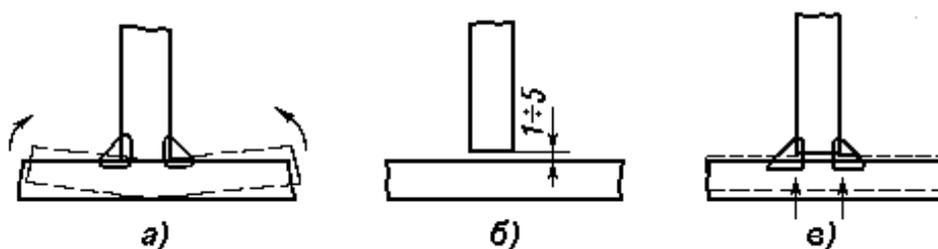


Рис. 5.52. Уменьшение угловой деформации при сварке тавровых соединений путем увеличения зазора в стыке

14. Если позволяют условия, для предотвращения деформаций применять *метод предварительных прихваток* или *ребер жесткости* (рис. 5.53): косынки 2 крепятся к прихваткам 3 и соединяют свариваемые листы 1.

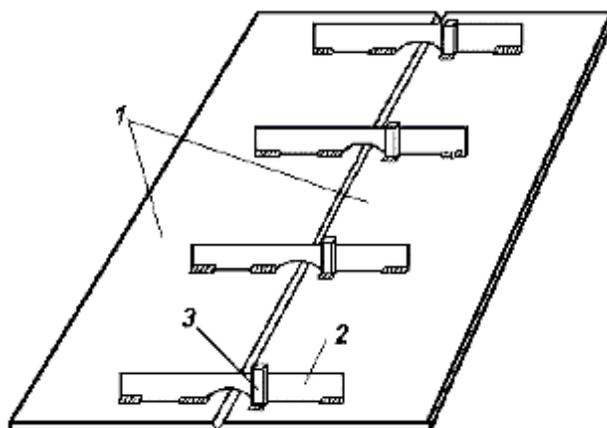


Рис. 5.53. Применение временных ребер жесткости при сварке листов встык

15. Использовать *метод жесткого закрепления заготовок* перед сваркой, применяя сборочно-сварочные приспособления и кондукторы.

16. Для снятия внутренних напряжений применять общий *отжиг* сварного изделия, *проковку шва и околошовной зоны*. Для устранения деформаций можно применять также *механическую правку* в холодном или горячем состоянии.

5.13. Основные виды дефектов сварных швов и их причины

Дефекты сварных швов разделяются на внешние и внутренние. К **внешним дефектам** относятся: нарушения установленных размеров и формы шва, наплывы (рис. 5.54, а), подрезы (рис. 5.54, б), наружный непровар (рис. 5.54, в), поверхностные трещины и поры (рис. 5.54, г), прожоги.

К **внутренним дефектам** относятся: газовая пористость и внутренние трещины (рис. 5.54, д), непровары (рис. 5.54, е), неметаллические включения

(рис. 5.54, ж), образование крупного зерна из-за перегрева сварного соединения, пережог (окисление границ зерен).

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.

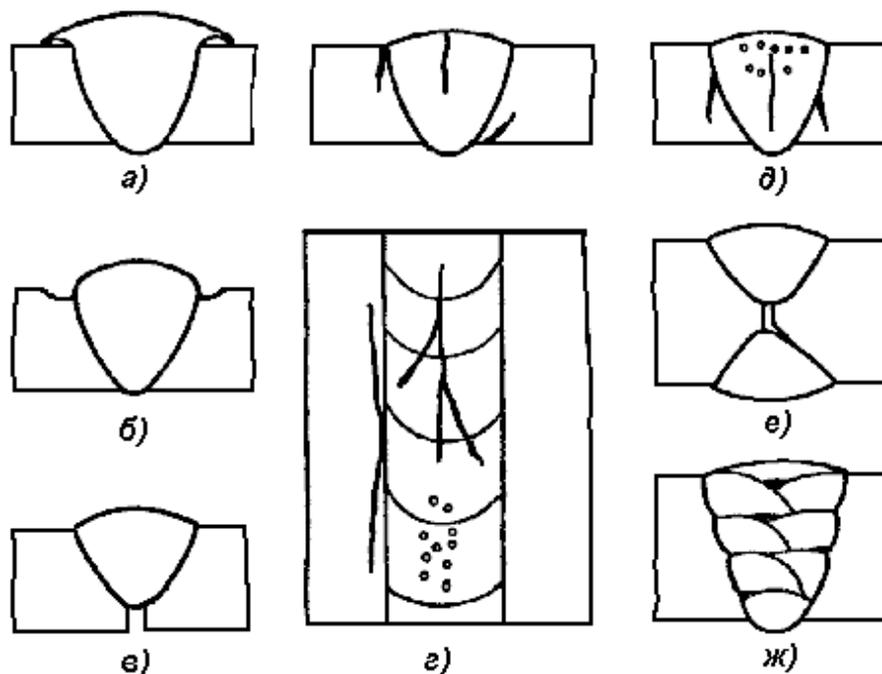


Рис. 5.54. Виды дефектов в сварных соединениях

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.

Неметаллические 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).

5.14. 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. 5.55. При испытаниях на растяжение на разрывной машине изготавливается образец (рис. 5.55, 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. 5.55, б). Схема испытания на изгиб (рис. 5.55, в) проводится до образования первой трещины. Максимальный угол загиба 180° характеризует хорошую пластичность.

Испытание на ударную вязкость проводят с надрезом по шву (рис. 5.55, г).

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.

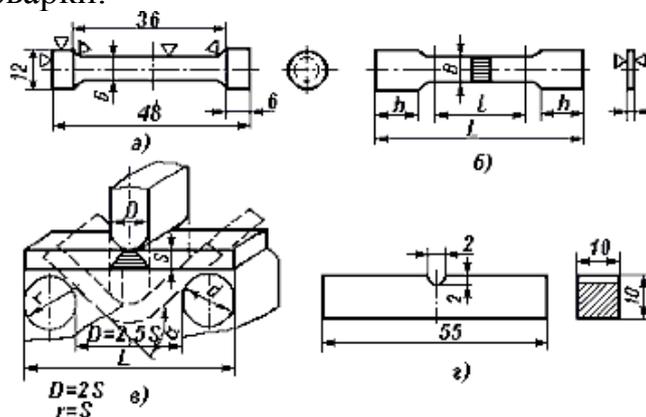


Рис. 5.55. Образцы для испытания механических свойств

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.

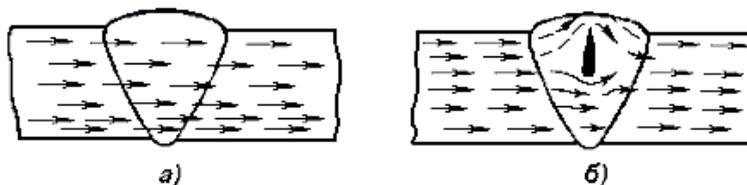


Рис. 5.56. Путь линий магнитного потока при прохождении через сварной шов:
а - без дефектов, б - при наличии дефекта

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. 5.56). 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. 5.57.

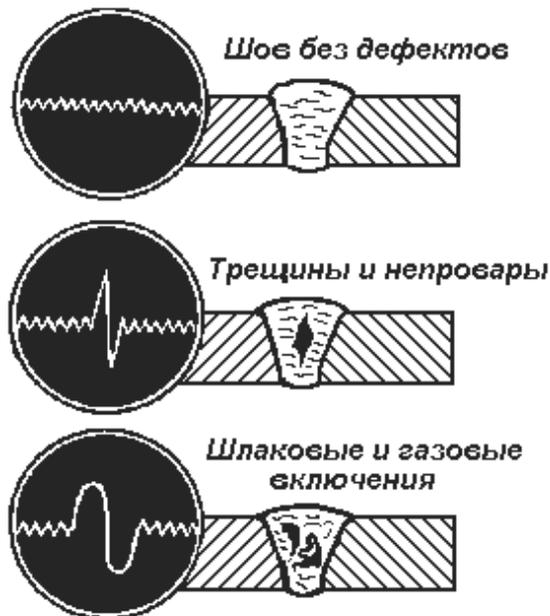


Рис. 5.57. Магнитографический метод контроля

Рентгеновское просвечивание основано на способности рентгеновских лучей проникать через металлы (рис. 5.58). 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.

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.

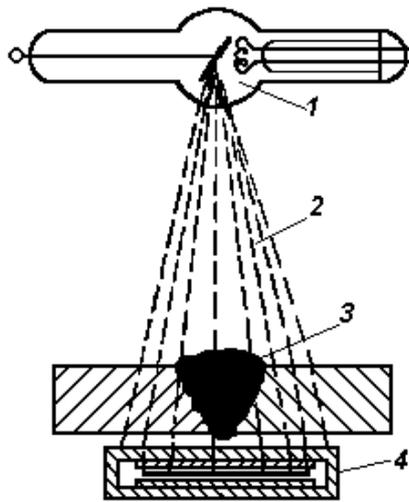


Рис. 5.58. Рентгеновское просвечивание сварного шва:

1 - рентгеновская трубка, 2 - излучение,
3 - шов, 4 - кассета с фотопленкой

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. 5.59.

Ультразвук вводят в изделие под углом к поверхности металла. При встрече с дефектом ультразвуковая волна отражается и фиксирует на экране осциллографа наличие дефекта.

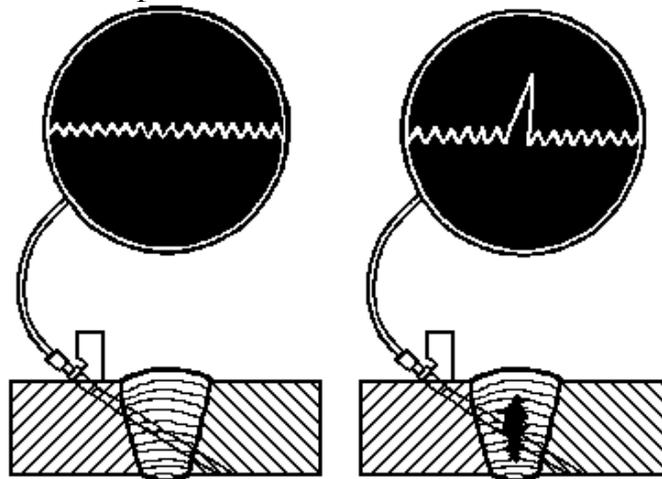


Рис. 5.59. Ультразвуковой контроль

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.

5.15. Технологические особенности сварки различных металлов и сплавов

Любое соединение, в том числе и сварное, ведет к ухудшению свойств по сравнению с основным однородным, цельным материалом. Сварное соединение состоит из трех зон (рис. 5.60): зоны шва 1, зоны термического влияния 2 и зоны основного металла 3.

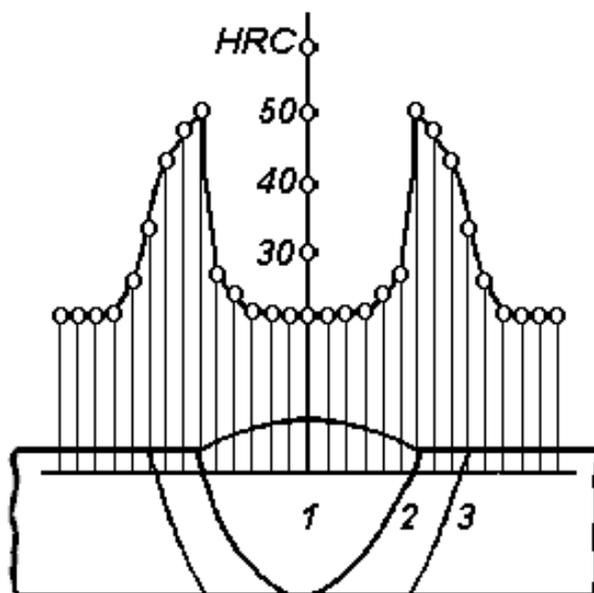


Рис. 5.60. Распределение твердости по сечению сварного соединения из закаливающейся стали

Каждая из зон имеет три параметра измерения: ширину, длину, толщину. При некоторых способах сварки, например, при контактной сварке, один из параметров зоны шва может иметь размер, близкий к нулю. На рис. 5.60 видно, что каждая из зон сварного соединения имеет разную твердость и, следовательно, пластичность. Эта разнородность приводит к снижению эксплуатационных характеристик изделия.

5.15.1. 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:

$$C_{\text{экв.}} = C + \text{Mn}/20 + \text{Ni}/15 + \text{Cr}/10 + \text{Mo}/10 + \text{V}/10, \%$$

(Здесь С, 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 $C_{\text{экв}}$ 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).

5.15.2. Влияние углерода и легирующих элементов на свариваемость

Стали с содержанием **углерода** до 0,35 % свариваются хорошо, а далее, с повышением содержания углерода, свариваемость снижается из-за появле-



ния в околошовной зоне закалочных структур и газовых пор вследствие выгорания углерода.

Марганец содержится обычно в стали в количестве от 0,3 до 0,8 % и не затрудняет сварку, при повышении содержания Mn более 1 % образуются трещины, требуется подогрев. При сварке стали Гатфильда Г13 (с 13 % марганца) сварка стали становится проблемой из-за образования мартенсита и трещин.

Кремний содержится в обычной углеродистой стали в количестве от 0,02 до 0,3 % и не влияет на свариваемость. При 0,8-1,5 % кремний затрудняет сварку, т. к. придает стали жидкотекучесть и образует тугоплавкие окислы и сплавы.

Сера является вредной примесью и ухудшает свариваемость, образуя горячие трещины.

Фосфор является вредной примесью и ухудшает свариваемость, т. к. образует хрупкое фосфористое железо, которое придает стали хладноломкость.

Хром - самый распространенный легирующий элемент - повышает прочность, твердость, закаливаемость и устойчивость против коррозии, но ухудшает свариваемость.

Никель повышает прочность и пластичность, улучшает свариваемость, но при сварке требуется защита от кислорода воздуха во избежание выгорания никеля.

Медь в количестве до 0,5 % входит в состав ряда низколегированных сталей, в том числе строительных природнолегированных. Не ухудшает свариваемость.

Ванадий придает стали прочность, вязкость, упругость, ухудшает сварку, т. к. способствует образованию закалочных структур.

Молибден повышает ударную вязкость и жаропрочность. Сварка затруднена из-за образования трещин.

Титан повышает ударную вязкость, жаропрочность, улучшает свариваемость, способствует измельчению зерна, энергичный раскислитель. Связывает углерод, препятствуя образованию карбидов хрома по границам зерен и возникновению межкристаллитной коррозии.

Ниобий связывает углерод, как и титан, препятствует образованию карбидов хрома и обеднению аустенита углеродом в кислотостойких сталях, тем самым улучшает свариваемость.

Алюминий является сильным раскислителем, но может одновременно вызвать окисление углерода, что приводит к образованию пор в шве. В небольших количествах свариваемость не ухудшает.

Бор повышает жаростойкость, прокаливаемость, теплоустойчивость сталей. В небольших количествах на свариваемость влияет умеренно.

Кобальт повышает теплоустойчивость и в небольших количествах свариваемость не ухудшает.

Вольфрам повышает твердость и снижает свариваемость.

5.15.3. Сварка углеродистых сталей

Сварка *низкоуглеродистых сталей* не вызывает никаких затруднений - хорошо свариваются всеми способами.

Среднеуглеродистые стали (С от 0,26 до 0,45 %) свариваются проволокой с пониженным содержанием углерода (С=0,08 %), на небольшом токе и с небольшим проваром с целью уменьшения доли основного металла в шве. (Полезна разделка кромок.)

Высокоуглеродистые стали (С > 0,46 %), как правило, не применяют для изготовления сварных конструкций. Необходимость их сварки возникает при ремонтных работах и наплавке. Необходим предварительный, сопутствующий и последующий подогрев, как для плохо сваривающихся сталей.

5.15.4. Сварка легированных сталей

Сварка *низколегированных сталей* (стали перлитного класса) с содержанием легирующих элементов в сумме не более 0,25 %, при содержании углерода не более 0,15 %. Эти стали широко применяются в строительстве для изготовления ответственных и облегченных конструкций. Все эти стали относятся к категории удовлетворительно сваривающихся.

Для сварки конструкций промышленных и гражданских сооружений применяют стали 15ХСНД, 14Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 16ГС и др. Для изготовления арматуры железобетонных конструкций и сварных газопроводных труб применяют стали 18Г2С, 25Г2С, 35ГС, 20ХГ2Ц (Ц- цирконий, содержание 0,14 %).

Стали 09Г2С и 10Г2С1 хорошо свариваются всеми способами. При сварке стали типа 15ХСНД возможно образование закалочных структур и даже трещин в зоне шва. Кроме того, выгорание углерода, как правило, вызывает образование пор в металле шва. Ручную дуговую сварку лучше выполнять электродами с покрытием на фтористо-кальциевой основе (например, марка УОНИ). Автоматическую сварку производят проволокой Св08А или Св08ГА под флюсом АН-348А или ОСЦ-45. Сварку листов до 40 мм можно производить без разделки кромок. При этом равнопрочность сварного соединения обеспечивается переходом легирующих элементов из электродной проволоки в металл шва.

В зимних условиях сварку конструкций из сталей типа 15ХСНД разрешается производить только при температурах не ниже -10 °С. При более низких температурах изделия подвергаются предварительному нагреву в зоне сварки на ширине 100-120 мм по обе стороны шва до 100-150 °С. При температуре -25 °С сварка не допускается. Электрошлаковая сварка сталей



любой толщины производится проволокой Св10Г2 под флюсом АН-8 при любой температуре окружающего воздуха.

Сварка **среднелегированных сталей** (перлитного класса). Сюда относятся теплоустойчивые стали типа 15ХМ, 20ХМ, 15Х1М1Ф. При сварке возможно образование мелких трещин в околошовной зоне. Применяются электроды с проволокой той же марки, что и свариваемая сталь, покрытие - фтористо-кальциевое. Рекомендуется подогрев и отпуск после сварки.

Сварка **среднелегированных высокопрочных сталей (хромансильей)**. Это стали перлитного класса типа 25ХГС, 30ХГС, 35ХГС, 35ХГСА. Склонны к подкалке и трещинообразованию при сварке. Ручная сварка производится электродами с фтористо-кальциевым покрытием, сварочная проволока Св-08А. Может быть также рекомендована нержавеющая сварочная проволока с повышенным содержанием никеля типа Св-10Х16НЧ5Мб. Сварку надо вести как можно более короткой дугой с подогревом. Если требуется по техническим условиям, изделие подвергают закалке и отпуску.

Сварка **высокохромистых сталей** (более 12 % хрома). При охлаждении на воздухе дают ферритную, феррито-мартенситную или мартенситную структуры. Характеризуются плохой свариваемостью. Сварка рекомендуется при возможно меньшем тепловложении, надо применять пониженный ток и валики малого сечения для ускорения охлаждения при сварке сталей ферритного класса (15Х25Т, 15Х28). Отжигать после сварки при 800-900 °С для растворения хрупких фаз с последующим быстрым охлаждением.

Мартенситные нержавеющие стали типа 30Х13, 40Х13 при сварке закаливаются, поэтому требуют предварительного, сопутствующего подогрева и последующей термической обработки (закалка и отпуск).

Сварка **аустенитных хромоникелевых сталей**. Введение в хромистую сталь 18 % Cr и 8 % Ni переводит ее из ферритного класса в аустенитный. При сварке возможно выпадение карбидов хрома по границам зерен при продолжительном пребывании металла в зоне температур 500-800 °С и возникновение склонности к межкристаллитной коррозии. Для предотвращения этого явления необходимо сварку вести на малых токах (с малым тепловложением), применять охлаждающие медные подкладки и охлаждение водой. С целью исключения образования карбидов хрома в сталь вводят сильные карбидообразователи (титан, ниобий). Закалка после сварки с температуры 1050 °С фиксирует структуру аустенита (при нагреве карбиды хрома растворяются в аустените).

Сварка **высокомарганцовистых сталей** типа Г13. Содержание Mn 13 %. Структура стали - марганцовистый аустенит. При сварке требуется малое тепловложение и быстрое охлаждение водой. Это предотвращает распад аустенита с образованием мартенсита. Электродуговую сварку производят электродами на фтористо-кальциевой основе, проволока типа Х18Н9. Газовая сварка не рекомендуется из-за большого тепловложения.



Сварка *сталей карбидного класса*. Это высоколегированные быстрорежущие стали типа Р18 и ее заменители типа Р6М5. Характеризуются плохой свариваемостью. Широкое применение нашла электроконтактная сварка и сварка трением в инструментальном производстве для изготовления сверл, фрез и т. п. Режущая часть инструмента изготавливается из быстрорежущей стали, хвостовая - из стали 45. Заготовки диаметром до 30-40 мм предпочтительно сваривать трением, а заготовки большего диаметра - электроконтактной сваркой. Сразу после сварки необходим отжиг. Другие способы сварки не находят применения.

5.15.5. Сварка чугуна

Чугун - это сплав железа с углеродом (более 2,14 % С). От стали чугун отличается очень высокой жидкотекучестью и хрупкостью. Это один из лучших литейных сплавов.

Чугун обладает плохой свариваемостью по следующим причинам:

1. В сварном соединении при быстром охлаждении происходит *отбел* (т. е. появление белого чугуна, отличающегося высокой твердостью и хрупкостью, склонного к образованию трещин).

2. Интенсивное выгорание углерода при сварке ведет к образованию газовых пор.

3. Высокая жидкотекучесть (ценится только в литейном деле) требует специальных мер при сварке, вплоть до формовки участка сварки.

Технология сварки чугуна и выбор сварочных материалов базируются на структурной диаграмме (С-Si) и на графике зависимости скорости охлаждения от химического состава чугуна (С и Si).

Сварка чугуна применяется, как правило, в двух случаях: при заварке литейных раковин и при ремонте (заварке трещин и т. п.).

Существует много способов сварки чугуна и сварочных материалов. Неответственные изделия можно сваривать ручной дуговой сваркой на переменном токе электродом из проволоки Св-08 с рутиловым или с меловым покрытием даже без подогрева. Качество будет низкое и целиком зависит от квалификации сварщика.

Однако самое высокое качество и однородность структуры обеспечивает газовая сварка чугунными прутками с подогревом до 600-700 °С (лучше в термосе) и медленным охлаждением после сварки.

Чугунные прутки выплавляются диаметром 4, 6, 8, 10 мм с содержанием кремния до 3-3,5 % для газовой сварки и с покрытием (мел, графит, рутил и др.) - для дуговой сварки.

Для холодной сварки чугуна количество кремния в электроде увеличивается до 4-4,5 %.



5.15.6. Сварка алюминия и его сплавов

Сварка алюминия затруднена наличием тугоплавкой пленки оксида Al_2O_3 с $t_{пл} = 2060$ °С). Алюминий плавится при 657 °С. Поэтому алюминий, в отличие от стали, переходит из твердого состояния в жидкое, не меняя цвета, т. е. сварка не контролируется визуально.

Алюминий и его сплавы с марганцем и магнием хорошо свариваются аргоно-дуговой, а также газовой сваркой. Дуговая сварка покрытыми электродами применяется ограниченно для заварки дефектов литья и трещин в неотчетственных деталях.

Сварка дуралюмина дает низкое качество из-за образования хрупких структур в сварном соединении.

5.15.7. Сварка меди и ее сплавов

Медь и ее сплавы обладают низкой свариваемостью. Сварка меди осложняется ее способностью в жидком состоянии растворять кислород и водород. Кислород приводит к потере прочности из-за образования легкоплавкой эвтектики Cu_2O-Cu ($t_{пл} = 1064$ °С), располагающейся по границам зерен (температура плавления меди 1084 °С). Водород приводит к образованию газовых пор в шве. Свариваемость меди также затруднена из-за высокой теплопроводности.

Применяются различные способы сварки меди, в том числе газовая сварка с применением флюса (бура $Na_2B_4O_7$, борная кислота H_3BO_3 и борный ангидрид B_2O_3), дуговая сварка покрытым электродом. Лучшие результаты обеспечивает сварка меди и ее сплавов в среде защитных газов: в аргоне, азоте. Азот для меди, в отличие от стали, не является вредным газом.

5.15.8. Сварка титана и его сплавов

Титан - металл будущего - обладает комплексом ценных физико-химических свойств. Он легкий, почти как алюминий, прочен, как сталь, благороден, как золото. Его сварка осложняется высокой его активностью при нагреве в среде кислорода, водорода, азота, углерода. При этом титан все свои ценные свойства (прочность, коррозионную стойкость) теряет и становится хрупким.

Титан и его сплавы хорошо свариваются аргоно-дуговой сваркой, но требуют при этом тщательной газовой защиты, в том числе дополнительной защиты корня шва.



ЛИТЕРАТУРА

1. Дальский А.М. и др. Технология конструкционных материалов: Учебник. - М.: Машиностроение, 1985. - 664 с.
2. Кнорозов Б.В. и др. Технология металлов: Учебник. – М.: Metallurgy, 1978. - 902 с.
3. Солнцев Ю.П. и др. Металловедение и технология металлов: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1977. - 464 с.
4. Полухин П.И. и др. Технология металлов и сварка: Учебник – М.: Высшая школа, 1977. - 464 с.
5. Гуляев А.П. Металловедение. - М.: Metallurgy, 1985. - 540 с.
6. Методические пособия по лабораторным работам.
7. Горбунов Б.И. Обработка металлов резанием, металлорежущий инструмент и станки: Учебное пособие для студентов. – М.: Машиностроение, 1980. - 263 с.
8. Проников А.С. и др. Металлорежущие станки и автоматы: Учебник для машиностроительных вузов. – М: Машиностроение, 1981. - 479 с.
9. Справочник сварщика. /Ю.А. Данисов, Г.Н. Кочева, Ю.А. Маслов и др.– М.: Машиностроение, 1983. - 556 с.



О Г Л А В Л Е Н И Е

4. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ.....	3
4.1. Основы обработки металлов резанием.....	3
4.1.1. Кинематика резания.....	3
4.1.2. Методы формообразования поверхностей.....	3
4.1.3. Режим резания. Шероховатость поверхности.....	5
4.1.4. Геометрические параметры режущего инструмента.....	6
4.1.5. Образование и виды стружки.....	8
4.1.6. Силы резания.....	9
4.1.7. Наростообразование при резании.....	10
4.1.8. Упрочнение при резании.....	11
4.1.9. Тепловыделение при резании.....	12
4.1.10. Износ и стойкость инструмента.....	13
4.1.11. Вибрации при резании.....	14
4.1.12. Точность, качество и производительность обработки.....	15
4.2. Инструментальные материалы.....	16
4.2.1. Свойства инструментальных материалов.....	16
4.2.2. Инструментальные стали.....	16
4.2.3. Твердые сплавы.....	17
4.2.4. Сверхтвердые и керамические материалы.....	17
4.2.5. Абразивные материалы.....	18
4.3. Металлорежущие станки.....	18
4.3.1. Классификация металлорежущих станков.....	18
4.3.2. Кинематика станков.....	19
4.4. Обработка заготовок на токарных станках.....	20
4.4.1. Характеристика метода точения.....	20
4.4.2. Типы токарных станков.....	21
4.4.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления заготовок.....	23
4.4.4. Основные виды токарных работ.....	24
4.5. Обработка заготовок на сверлильных и расточных станках.....	26
4.5.1. Характеристика метода сверления.....	26
4.5.2. Типы сверлильных станков.....	26
4.5.3. Режущий инструмент и приспособления для закрепления инструмента и заготовок.....	28
4.5.4. Основные виды работ, выполняемых на сверлильных станках.....	29
4.5.5. Назначение и типы расточных станков.....	31
4.5.6. Режущий инструмент и схемы обработки заготовок на расточных станках.....	32
4.6. Обработка заготовок на шлифовальных станках.....	34
4.6.1. Характеристика метода шлифования.....	34
4.6.2. Основные типы шлифовальных станков.....	35
4.6.3. Режущий абразивный инструмент.....	36
4.6.4. Схемы обработки.....	36
4.6.5. Отделочная обработка поверхностей шлифовальными кругами и чистовыми резцами.....	40
4.6.6. Полирование.....	40
4.6.7. Абразивно-жидкостная отделка.....	41
4.6.8. Притирка.....	42
4.6.9. Хонингование.....	43



4.6.10. Суперфиниширование.....	44
4.7. Обработка заготовок на фрезерных станках.....	46
4.7.1. Характеристика метода фрезерования.....	46
4.7.2. Типы фрезерных станков.....	47
4.7.3. Режущий инструмент и технологическая оснастка фрезерных станков.....	48
4.7.4. Схемы обработки заготовок на фрезерных станках.....	50
4.8. Обработка заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках.....	50
4.8.1. Характеристика методов строгания, долбления и протягивания.....	50
4.8.2. Строгальные, долбежные и протяжные станки.	52
4.8.3. Режущий инструмент для строгания, долбления и протягивания.....	54
4.8.4. Схемы обработки заготовок на строгальных, долбежных и протяжных станках.....	55
4.9. Обработка заготовок на электрофизических и электрохимических станках.....	57
4.9.1. Характеристика электрофизических и электрохимических методов обработки.....	57
4.9.2. Электроэрозионные методы обработки.....	57
4.9.3. Электрохимические методы обработки.....	60
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	62
5.1. Физические основы процесса сварки.....	63
5.2. Электрическая дуга и источники ее питания.....	64
5.2.1. Понятие об электрической сварочной дуге и ее свойствах.....	65
5.2.2. Источники сварочного тока.....	67
5.2.2, а. Сварочные трансформаторы.....	69
5.2.2, б. Сварочные генераторы.....	70
5.2.2, в. Сварочные выпрямители.....	70
5.2.2, г. Устройства для повышения устойчивости горения дуги.....	71
5.3. Ручная дуговая сварка.....	71
5.3.1. Сварочная проволока.....	73
5.3.2. Классификация электродов по видам покрытий и по назначению.....	73
5.3.3. Технология и техника ручной дуговой сварки.....	76
5.3.4. Техничко-экономическое обоснование ручной дуговой сварки.....	78
5.4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом.....	78
5.4.1. Техничко-экономическое обоснование.....	80
5.5. Электрошлаковая сварка.....	81
5.5.1. Сварка электродной проволокой.....	81
5.5.2. Сварка пластинчатым электродом.....	82
5.5.3. Сварка плавящимся мундштуком.....	82
5.5.4. Оборудование для электрошлаковой сварки.....	82
5.5.5. Техничко-экономическое обоснование.....	82
5.6. Дуговая сварка в защитных газах.....	83
5.6.1. Аргонодуговая сварка.....	84
5.6.1, а. Полуавтоматическая аргонодуговая сварка.....	86
5.6.1, б. Автоматическая аргонодуговая сварка.....	87
5.6.1, в. Аргонодуговая сварка в камере с контролируемой атмосферой.....	87
5.6.1, г. Техничко-экономическое обоснование.....	88
5.6.2. Дуговая сварка в среде углекислого газа.....	88
5.6.2, а. Техничко-экономическое обоснование.....	90
5.7. Газовая сварка.....	91
5.7.1. Сварочные материалы для газовой сварки: газы, присадочная	



проволока, флюсы.....	91
5.7.2. Оборудование для газовой сварки.....	93
5.7.3. Виды, свойства и регулирование сварочного пламени.....	94
5.7.4. Технология газовой сварки.....	96
5.7.5. Пост для газовой сварки.....	97
5.7.6. Техничко-экономическое обоснование.....	98
5.8. Газовая ацетилено-кислородная резка металлов.....	98
5.9. Контактная электрическая сварка.....	100
5.9.1. Электроконтактная стыковая сварка.....	100
5.9.2. Точечная электроконтактная сварка.....	102
5.9.2, а. Оборудование для точечной электроконтактной сварки.....	103
5.9.2, б. Техничко-экономическое обоснование.....	104
5.9.3. Шовная (роликовая) электроконтактная сварка.....	104
5.9.3, а. Техничко-экономическое обоснование.....	105
5.9.4. Конденсаторная сварка.....	106
5.10. Специальные виды сварки.....	106
5.10.1. Плазменная сварка.....	106
5.10.1, а. Оборудование.....	108
5.10.1, б. Техничко-экономическое обоснование.....	108
5.10.2. Электронно-лучевая сварка.....	109
5.10.2, а. Оборудование.....	109
5.10.2, б. Техничко-экономическое обоснование.....	111
5.10.3. Сварка трением.....	111
5.10.3, а. Техничко-экономическое обоснование.....	112
5.10.4. Холодная сварка.....	113
5.10.4, а. Техничко-экономическое обоснование.....	114
5.10.5. Диффузионная сварка в вакууме.....	114
5.10.5, а. Техничко-экономическое обоснование.....	115
5.10.6. Ультразвуковая сварка.....	115
5.10.6, а. Техничко-экономическое обоснование.....	116
5.10.7. Сварка лазерным лучом.....	116
5.10.7, а. Техничко-экономическое обоснование.....	117
5.10.8. Сварка взрывом.....	118
5.10.8, а. Техничко-экономическое обоснование.....	119
5.11. Виды сварных швов.....	119
5.12. Деформации и напряжения при сварке и меры их предупреждения.....	121
5.13. Основные виды дефектов сварных швов и их причины.....	123
5.14. Контроль качества сварки.....	125
5.15. Технологические особенности сварки различных металлов и сплавов.....	129
5.15.1. Понятие свариваемости.....	129
5.15.2. Влияние углерода и легирующих элементов на свариваемость.....	130
5.15.3. Сварка углеродистых сталей.....	132
5.15.4. Сварка легированных сталей.....	132
5.15.5. Сварка чугуна.....	134
5.15.6. Сварка алюминия и его сплавов.....	135
5.15.7. Сварка меди и ее сплавов.....	135
5.15.8. Сварка титана и его сплавов.....	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136



**Константин Георгиевич Герасимович
Юрий Александрович Евтюшкин
Николай Ильич Фомин
Ирина Александровна Хворова**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Часть 2

Учебное пособие

Подписано к печати
Формат 60x84/16. Бумага ксероксная.
Плоская печать. Усл.печ.л.8,14.Уч.-изд.л. 7,37.
Тираж 150 экз. Заказ . Цена свободная.
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18.07.94.
Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.