

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ БЮДЖЕТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Воронежский государственный технический университет
(ВГТУ)

Конспект лекций
по дисциплине
«Технология обработки авиационных материалов»

Воронеж, 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| Тема 1. Основные характеристики авиационных материалов..... | 5 |
| 1.1 Понятие об основных механических свойствах металлов и сплавов..... | 5 |
| 1.2 Сталь..... | 6 |
| 1.3 Цветные металлы и сплавы..... | 7 |
| 1.4 Понятие о композиционных материалах..... | 9 |
| Тема 2. Технологии литейного производства | 12 |
| 2.1 Сущность и основные способы литья | 12 |
| 2.2 Литье в песчаные формы | 12 |
| 2.3 Оболочковое литье | 14 |
| 2.4 Литье по выплавляемым моделям | 14 |
| 2.5 Литье в кокиль | 16 |
| 2.6 Литье под давлением | 17 |
| 2.7 Основные дефекты литья и их исправление | 17 |
| Тема 3. Технологии обработки металлов давлением (ОМД) | 18 |
| 3.1 Сущность и основные способы | 18 |
| 3.2 Нагрев металла и нагревательные устройства | 19 |
| 3.3 Прокатка | 21 |
| 3.4 Волочение | 23 |
| 3.5 Ковка | 24 |
| 3.6 Штамповка | 26 |
| 3.7 Ротационное обжатие | 30 |
| Тема 4. Технологии сварки, пайки и склеивания | 31 |
| 4.1 История развития сварочного производства | 31 |
| 4.2 Физические основы сварки | 31 |
| 4.3 Классификация способов сварки | 32 |
| 4.4 Типы сварных соединений | 32 |
| 4.5 Ручная электродуговая сварка открытой дугой | 33 |
| 4.6 Дуговая сварка под слоем флюса | 35 |
| 4.7 Дуговая сварка в среде защитного газа | 36 |
| 4.8 Электро-контактная сварка | 38 |

| | |
|---|----|
| 4.9 Оборудование и технология электродуговой сварки | 39 |
| 4.10 Газовая сварка..... | 40 |
| 4.11 Пайка материалов | 42 |
| Тема 5. Технологии обработки металлов резанием | 45 |
| 5.1 Основы процесса резания металлов | 45 |
| 5.2 Трение и деформация металла при резании | 49 |
| 5.3 Силы и тепловыделение в процессе резания | 52 |
| 5.4 Типы и геометрия резцов | 55 |
| 5.5 Точение и строгание | 58 |
| 5.6 Сверление, зенкерование и развертывание | 63 |
| 5.7 Фрезерование и протягивание | 69 |
| 5.8 Шлифование металлов | 75 |
| Тема 6. Электрические и лучевые методы обработки | 85 |
| 6.1 Электрофизические методы обработки материалов | 86 |
| 6.2 Электрохимические методы обработки материалов | 89 |
| 6.3 Лучевые методы обработки | 94 |
| 6.4 Ультразвуковая обработка | 97 |
| Список литературы | 99 |

ВВЕДЕНИЕ

В учебнике рассматриваются различные технологии обработки авиационных материалов. Анализируются технологические процессы обработки важнейших конструкционных материалов, широко применяемых в машиностроительной, авиационной, ракетной, автомобильной, электротехнической и микроэлектронной промышленности, объём выпуска которых составляет индустриальную, экономическую и оборонную мощь любого государства.

Проанализированы технологии обработки металлов давлением (прокатка, ковка, штамповка, волочение, ротационное обжатие) и литьем (в песчаные формы, под давлением, по выплавляемым моделям, в кокиль, в оболочковые формы) при получении поковок и отливок из деформируемых и литейных металлических материалов. Обсуждаются различные процессы сварки и пайки, порошковой металлургии и обработки материалов резанием (точение, строгание, фрезерование, протягивание, сверление, зенкерование, развертывание, шлифование), электрические и лучевые методы обработки.

ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Из свойств, которыми могут обладать материалы, механические свойства в большинстве случаев являются важнейшими. Все наиболее ответственные детали и изделия изготавливают из металлов.

Способность металла сопротивляться воздействию внешних сил характеризуется механическими свойствами. Поэтому при выборе материала для изготовления деталей машин необходимо, прежде всего, учитывать его механические свойства: прочность, упругость, пластичность, ударную вязкость, твердость и выносливость. Эти свойства определяют по результатам механических испытаний, при которых металлы подвергаются воздействию внешних сил (нагрузок). Внешние силы могут быть статическими, динамическими или циклическими (повторно-переменными). Нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию. Напряжение – величина нагрузки, отнесенная к единице площади поперечного сечения испытуемого образца. Деформация – изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Деформация может быть упругой, исчезающей после снятия нагрузки, и пластической, остающейся после снятия нагрузки. Упругой деформацией называется обратимая деформация, полностью исчезающая после снятия вызывающих ее напряжений.

Упругая деформация на диаграмме деформации характеризуется линией

ОА (рис.1.1).

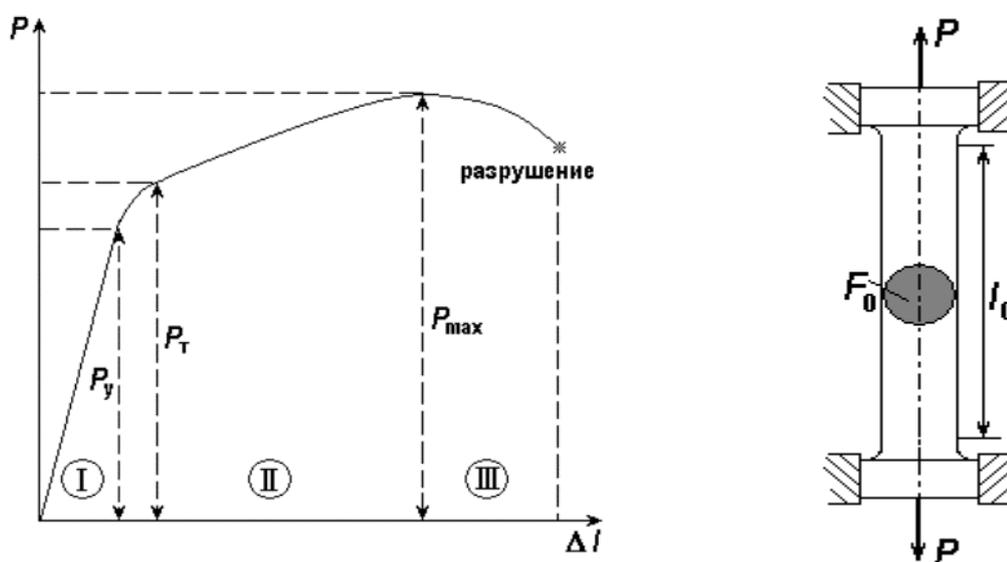


Рис.1.1 Диаграмма растяжения пластичного материала

Свойство твердых тел, не разрушаясь, необратимо изменять свои внешние формы (пластически течь) под действием внешних сил или внутренних напряжений называют **пластической деформацией**.

1.1 Понятие об основных механических свойствах металлов и сплавов.

Основными механическими свойствами являются **прочность, упругость, вязкость, твердость**. Зная механические свойства, конструктор обоснованно выбирает соответствующий

материал, обеспечивающий надежность и долговечность конструкций при их минимальной массе. Механические свойства определяют поведение материала при деформации и разрушении от действия внешних нагрузок. В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при:

1. статическом нагружении – нагрузка на образец возрастает медленно и плавно.
2. динамическом нагружении – нагрузка возрастает с большой скоростью, имеет ударный характер.
3. повторно, переменном или циклическим нагружении – нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению.

Для получения сопоставимых результатов образцы и методика проведения механических испытаний регламентированы ГОСТами.

Прочность - это способность металла или сплава противостоять деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок - растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих.

Твердостью называется способность металла или сплава оказывать сопротивление проникновению в него другого, более твердого тела.

Упругостью называется способность металла или сплава восстанавливать первоначальную форму после прекращения действия внешней нагрузки.

Пластичностью называется способность металла или сплава, не разрушаясь, изменять форму под действием нагрузки и сохранять эту форму после ее снятия.

Ударной вязкостью называется способность металла или сплава сопротивляться действию ударных нагрузок. Ударная вязкость измеряется в кгс•м/см² (Дж/м²).

Ползучестью называется свойство металла или сплава медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки (особенно при повышенных температурах).

Усталостью называется постепенное разрушение металла или сплава при большом числе повторно-переменных нагрузок; свойство выдерживать эти нагрузки называется выносливостью.

1.2 Сталь.

Сталь - сплав железа с углеродом при содержании углерода до 2,14%. Кроме того, в состав стали обычно входят марганец, кремний, сера и фосфор, которые попадают в сталь из руды или кокса; некоторые элементы могут быть введены для улучшения физико-химических свойств, специально (легирующие элементы).

Углеродистые конструкционные стали подразделяются на стали обыкновенного качества и качественные.

Стали обыкновенного качества (ГОСТ380-94) изготавливают следующих марок Ст0, Ст1, Ст2,..., Ст6 (с увеличением номера возрастает содержание углерода, например, Ст4 - углерода 0.18-0.27%, марганца 0.4-0.7%). (ГОСТ1050-88) маркируют цифрами 08, 10, 15,..., 85, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Легированные конструкционные стали (ГОСТ4543-71) применяют в тех случаях, когда выигрыш от повышения нагрузочной способности детали машины превышает повышение стоимости материала. Естественно, чем больше легирующих элементов содержит сталь, чем они дороже, тем дороже и сама сталь.

Легированные конструкционные стали маркируют цифрами и буквами. Двухзначные цифры, приводимые в начале марки, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы справа от цифры обозначают легирующий элемент. Пример, сталь 12Х2Н4А содержит 0.12% С, 2% Cr, 4% Ni и относится к высококачественным, на что указывает в конце марки буква "А". Причем для обозначения легирующих элементов в марках легированных сталей приняты следующие условные сокращения:

А – азот К – кобальт Т – титан Б – ниобий М – молибден Ф- ванадий

В – вольфрам Н – никель Х – хром Г – марганец
П – фосфор Ц – цирконий Д – медь Р – бор Ю – алюминий
Е – селен С – кремний Ч – редкоземельные металлы

Цифра после буквы, обозначающей легирующий элемент, указывает на содержание этого элемента в процентах. Если цифры нет, то сталь содержит 0,8-1,5% легирующего элемента, за исключением молибдена и ванадия (содержание которых в сталях обычно до 0,2-0,3%), а также бора (в стали с буквой Р его должно быть не менее 0,001%).

Коррозионно-стойкие и жаростойкие стали и сплавы (ГОСТ5632-72)

Жаростойкие стали и сплавы. Повышение окалинстойкости достигается введением в сталь главным образом хрома, а также алюминия или кремния, т. е. элементов, образующих в процессе нагрева защитные пленки оксидов $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al, Fe)_2O_3$. Для изготовления различного рода высокотемпературных установок, деталей печей и газовых турбин применяют жаростойкие ферритные (12Х17, 15Х25Т и др.) и аустенитные (20Х23Н13, 12Х25Н16Г7А, 36Х18Н25С2 и др.) стали, обладающие жаропрочностью. Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали устойчивы к электрохимической коррозии.

Стали 12Х13 и 20Х13 применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам (клапанов гидравлических прессов, предметов домашнего обихода), а также изделий, испытывающих действие слабо агрессивных сред (атмосферных осадков, водных растворов солей органических кислот). Стали 30Х13 и 40Х13 используют для карбюраторных игл, пружин, хирургических инструментов и т. д. Стали 15Х25Т и 15Х28 используют чаще без термической обработки для изготовления сварных деталей, работающих в более агрессивных средах и не подвергающихся действию ударных нагрузок, при температуре эксплуатации не ниже $-20^{\circ}C$. Сталь 12Х18Н10Т получила наибольшее распространение для работы в окислительных средах (азотная кислота) и в бытовой технике (посуда).

Инструментальные стали

Углеродистые стали (ГОСТ 1435-90). Углеродистые инструментальные стали У7, У8, У10, У11, У12, У13 применяются обычно в закаленном состоянии.

Легируемые инструментальные стали (ГОСТ5950-73) (11ХФ, 13Х, ХВСГ, 9ХС, Х, В2Ф) пригодны для резания материалов невысокой прочности ($\sigma_B=500\div600$ МПа) с небольшой скоростью (до 5-8м/мин). Их используют для инструмента, не подвергаемого в работе нагреву свыше $200-250^{\circ}C$. Легируемые стали по сравнению с углеродистыми обладают большей прокаливаемостью.

Быстрорежущие стали (ГОСТ) Эти стали обладают термостойкостью в условиях резания до $650^{\circ}C$. Основным легирующими элементами этих сталей являются вольфрам, молибден, кобальт и ванадий. Быстрорежущие стали обозначают буквой "Р", следующая за ней цифра указывает на процентное содержание вольфрама: (Р18, Р6М5, Р6М5К5, Р9К5, Р18К8М5Ф2 и т.д.) Р6М5К5-быстрорежущая сталь, содержащая 6,0% вольфрама 5,0% молибдена 5,0% кобальта. Пример: Сталь Р18 - 0.7-0.8% С, 3.8-4.4% Cr, 17.5-19% W, 1-1.4% V, 0.5-1% Mo.

1.3 Цветные металлы и сплавы.

Медные сплавы разделяют на бронзы и латуни.

Бронзы- это сплавы меди с оловом (4 - 33% Sn), свинцом (до 30% Pb), алюминием (5-11% Al), кремнием (4-5% Si), сурьмой и фосфором, и другими элементами (ГОСТ 493-79, ГОСТ 613-79, ГОСТ 5017-74, ГОСТ 18175-78).

Латуни - сплавы меди с цинком (до 50% Zn) и небольшими добавками алюминия, кремния, свинца, никеля, марганца (ГОСТ 15527-70, ГОСТ 17711-80). Медные сплавы, предназначенные для изготовления деталей методами литья, называют литейными, а сплавы, предназначенные для изготовления деталей пластическим деформированием - сплавами, обрабатываемыми давлением. Медные сплавы обозначают начальными буквами их названия

(Бр или Л), после чего следуют первые буквы названий основных элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество элемента в процентах. Приняты следующие обозначения компонентов сплавов:

А – алюминий Мц – марганец С – свинец Б – бериллий Мг – магний Ср – серебро Ж – железо Мш – мышьяк Су – сурьма К – кремний Н – никель Т – титан Кд – кадмий О – олово Ф – фосфор Х – хром Ц – цинк.

Сплавы алюминия можно разделить на **деформируемые**, предназначенные для получения полуфабрикатов (листов, плит, прутков и т. д.), а также поковок и штампованных заготовок и **литейные**, предназначенные для фасонного литья.

Все сплавы алюминия можно разделить на деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов (листов, плит, прутков и т. д.), а также поковок и штампованных заготовок и литейные, предназначенные для фасонного литья.

Дуралюмины. Дуралюминами называются сплавы на основе элементов Al-Cu-Mg, в которые дополнительно вводят марганец. Дуралюмин, изготавливаемый в листах, для защиты от коррозии подвергают плакированию, т.е. покрытию тонким слоем алюминия высокой чистоты. Из сплава Д16 изготавливают обшивки, шпангоуты, стрингера и лонжероны самолетов, силовые каркасы, строительные конструкции, кузова грузовых автомобилей и т.д.

Высокопрочные сплавы. Предел прочности этих сплавов достигает 550-700 МПа, но при меньшей пластичности, чем у дуралюминов. Представителем высокопрочных алюминиевых сплавов является **сплав В95**.

Сплавы дляковки и штамповки. Сплавы этого типа отличаются высокой пластичностью и удовлетворительными литейными свойствами, позволяющими получить качественные слитки для последующей обработки давлением. **Сплав АК6** используют для деталей сложной формы и средней прочности, изготовление которых требует высокой пластичности в горячем состоянии.

Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой.

К этим сплавам относятся сплавы алюминия с марганцем или с магнием. Сплавы легко обрабатываются давлением, хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Обработка резанием затруднена. Сплавы (АМц, АМг2, АМг3) применяют для сварных и клепанных элементов конструкций, испытывающих небольшие нагрузки и требующих высокого сопротивления коррозии.

Литейные алюминиевые сплавы.

Сплавы Al-Si (силумины). Отличаются высокими литейными свойствами, а отливки – большой плотностью. Сплавы Al-Si (АЛ2, АЛ4, АЛ9) сравнительно легко обрабатываются резанием. Сплав АЛ9 – $\sigma_B=200\text{МПа}$, $\sigma_{0,2}=140\text{МПа}$, $\delta=5\%$.

Сплавы Al-Cu. Эти сплавы (АЛ7, АЛ19) после термической обработки имеют высокие механические свойства при нормальной и повышенных температурах и хорошо обрабатываются резанием. Литейные свойства низкие. Сплав АЛ7 используют для отливки небольших деталей простой формы, сплав склонен к хрупкому разрушению. Сплав АЛ7 – $\sigma_B=240\text{МПа}$, $\sigma_{0,2}=160\text{МПа}$, $\delta=7\%$.

Сплавы Al-Mg. Имеют низкие литейные свойства. Характерной особенностью этих сплавов является хорошая коррозионная стойкость, повышенные механические свойства и обрабатываемость резанием. Сплавы АЛ8, АЛ27, АЛ13 и АЛ22 предназначены для отливок, работающих во влажной атмосфере, например, в судостроении и авиации. Сплав АЛ8 – $\sigma_B=350\text{МПа}$, $\sigma_{0,2}=170\text{МПа}$, $\delta=10\%$.

Сплавы на основе магния

Магниевого сплавы подразделяют на **деформируемые** (ГОСТ 14957-76) и **литейные** (ГОСТ 2856-79). Первые маркируются буквами "МА", вторые "МЛ". После букв указывается порядковый номер сплава в соответствующем ГОСТе.

Титан и сплавы на его основе

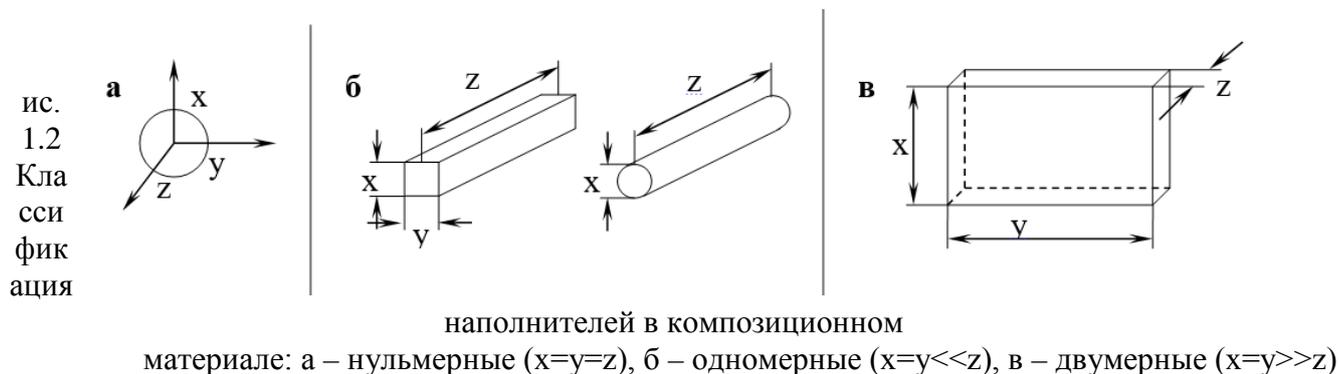
Удельная прочность титана выше, чем у некоторых легированных конструкционных сталей. Титан и его сплавы (ГОСТ 19807-91) маркируют буквами "ВТ" и порядковым номером: ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ4, ВТ8, ВТ14. Пять титановых сплавов обозначены иначе: 0Т4-0, 0Т4, 0Т4-1, ПТ-7М, ПТ-3В. Благодаря высокой коррозионной устойчивости титана в соленой воде из него изготавливают корпуса подводных аппаратов, эндопротезы, аппараты пищевой промышленности и тару для пищевых продуктов.

1.4 Понятие о композиционных материалах

Структура композиционных материалов представляет собой матрицу (основной компонент), содержащую в своем объеме упрочняющую (армирующую) фазу (или армирующие элементы), часто называемую наполнителем. Матрица и наполнитель разделены границей (поверхностью) раздела. Количество матричного материала в составе любого композита должно быть не менее 50% об. Наполнитель равномерно распределен в матрице и имеет заданную пространственную ориентацию.

Классификация армирующих элементов - наполнителя в матрице композиционного материала.

По геометрической форме наполнители разделяются на нульмерные, одномерные и двумерные (рис. 1.2). Нульмерный наполнитель представляет собой изометрические частицы, размеры которых могут варьироваться от 10⁻² до 10 мкм. Их размеры в направлении осей x, y, z одинаковы. Одномерный наполнитель – это волокна круглого или прямоугольного сечения. Линейные размеры, определяющие сечение волокон, составляют от 10⁻¹ до 10² мкм. Их длина на несколько порядков выше (1-10² мм). Двухмерный наполнитель – это слои (или пластины), длина и ширина которых (1-10² мм) значительно превышают их толщину (10⁻¹-10³ мкм).



Классификация композиционных материалов по структурному признаку.

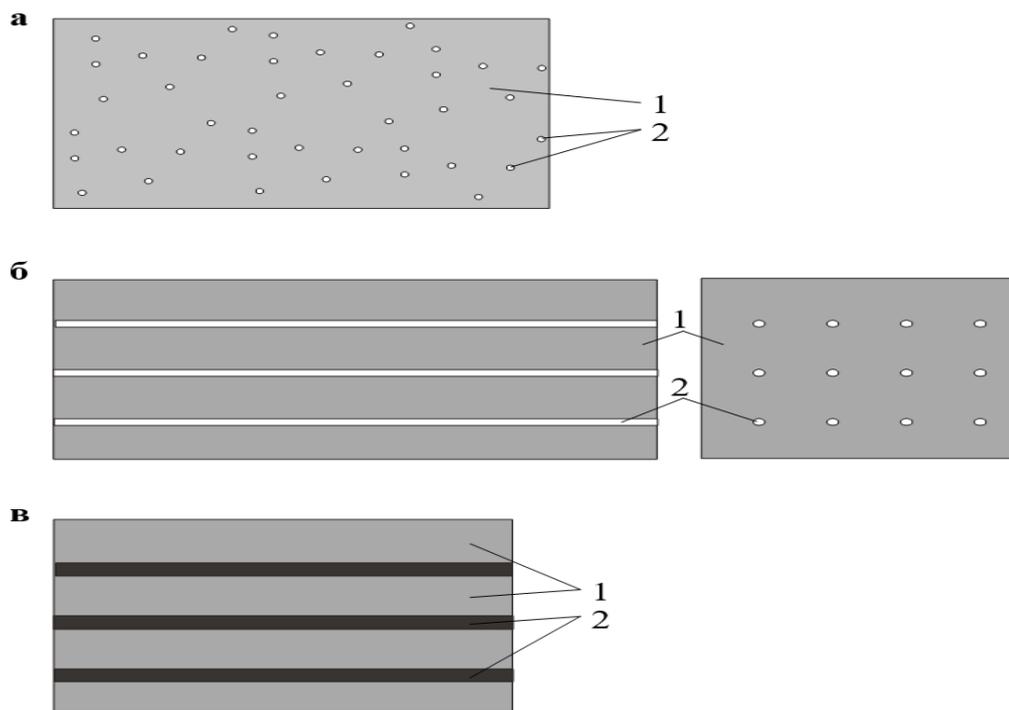
По структуре композиционные материалы подразделяются на дисперсно-упрочненные (армированные нульмерным наполнителем), волокнистые (армированные одномерным наполнителем) и слоистые (армированные двумерным наполнителем) (рис. 1.3).

В дисперсно-упрочненном композите дисперсные включения равномерно распределены в матрице, расстояния между соседними частицами задаются их объемной долей.

В волокнистых композитах волокна в матрице могут располагаться направленно, либо хаотично (направленно армированные и хаотично армированные материалы). При направленном армировании производится укладка волокон с заданным шагом, при хаотичном армировании расстояния между соседними отрезками волокон, также, как и в случае дисперсно-упрочненных материалов, определяются их объемным содержанием.

Структура слоистых композитов представлена чередующимися матричными и армирующими слоями. Матричными считаются слои большие по толщине. Объемная доля армирующих слоев, очевидно, задается соотношением толщин матричного и армирующего слоя.

ис. 1.3
Классификация композиционных материалов по структурному признаку:
– дисперсно-упроч-



енные (1 – матрица, 2 – дисперсные включения),
 б – волокнистые (1 – матрица, 2 – волокна),
 в – слоистые (1 – матричные слои, 2 – армирующие слои)

Представление о границе раздела «матрица-наполнитель» в композиционном материале.

Первостепенное значение при проектировании любого композиционного материала имеет вопрос о границе раздела между матрицей и наполнителем. Его важность обусловлена тем, что состояние указанной границы раздела определяет эффективность (или неэффективность) армирования композита тем или иным наполнителем. Так что же следует понимать под границей раздела? Речь идет о поверхности контакта матрицы с армирующим элементом (рис.1.4). В общем случае эта поверхность раздела по своему химическому составу и физико-механическим свойствам отличается от таковых для матрицы и армирующего элемента. Тогда можно дать следующее определение: граница (или поверхность) раздела между матрицей и наполнителем – это область изменения химического состава и физико-механических свойств (плотность, прочность, модуль упругости) композита. Она обеспечивает связь матрицы с армирующим элементом, необходимую для передачи и распределения нагрузки между составляющими композита.

Различают композиционные материалы с малой (менее 0,5 мкм), средней (0,5 – 1,0 мкм) и большой (более 1 – 2 мкм) толщиной границы. Экспериментально показано, что композиты с малой толщиной границы раздела между матрицей и наполнителем, чаще всего, имеют более предпочтительные механические характеристики по сравнению с двумя последними. Это объясняется тем, что длина поперечной трещины, зародившейся по границе раздела первого композита, слишком мала (она соответствует толщине границы), чтобы инициировать разрушение армирующего элемента. В этом случае концентрация напряжений у вершины такой трещины намного меньше концентрации напряжений, обусловленных наличием внутренних дефектов, содержащихся в объеме самого армирующего элемента.

Важнейшей характеристикой композиционного материала является стабильность границы раздела. Имеется в виду стабильность (неизменность или постоянство) фазового состава и структуры при заданных условиях эксплуатации: температуре, давлении, времени, газовой среде и внешней нагрузке.

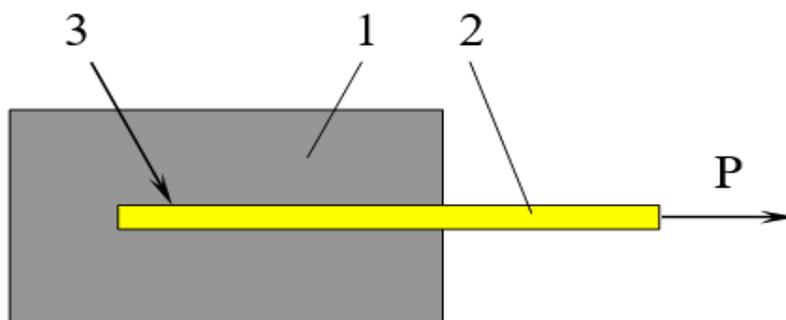


Рис. 1.4 Схематическое изображение границы раздела между матрицей и наполнителем:

1 – матрица, 2 – волокно (наполнитель), 3 – граница (поверхность) раздела, P – нагрузка, прикладываемая к волокну для вытягивания его из матрицы

Стабильность границы раздела призвана обеспечить высокую эксплуатационную надежность композита в течение всего времени его службы. Если при использовании композита в тех или иных условиях значительно изменяется фазовый состав его границы (т.е. происходит образование новых химических соединений с увеличением или уменьшением объема) и структура границы (например, значительный рост зерен вследствие рекристаллизации или возникновение диффузионной пористости), то это неминуемо приведет к резкому разупрочнению материала. Его невозможно использовать в качестве элементов конструкций, поскольку граница раздела в таком композите является нестабильной. Для получения стабильной границы в создаваемом композите следует рассматривать вопрос о термодинамической совместимости составляющих его фаз.

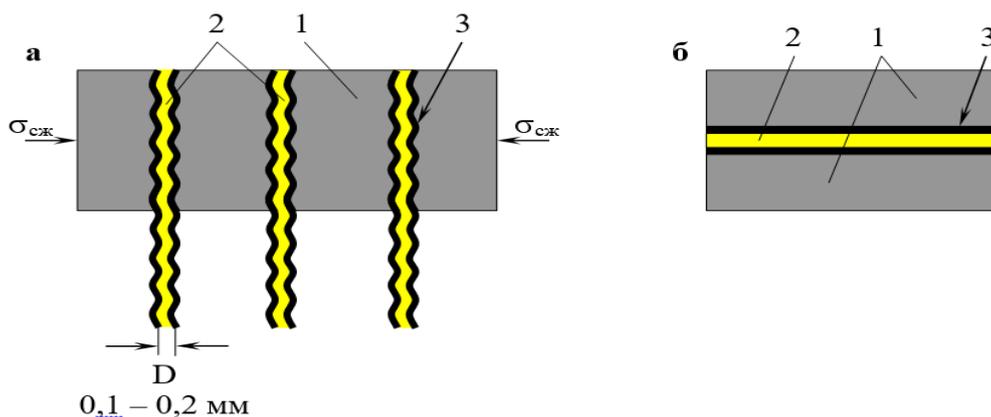


Рис. 1.5. Схематическое представление формирования механической и реакционной связи по границе раздела «матрица – наполнитель»:

а – механическая связь в КМ Al-W(волокно), где 1 – Al-матрица, 2 – W-проволока, 3 – промежуточный С-слой, $\sigma_{сж}$ – сжимающие напряжения, приложенные поперек волокна;

б – реакционная связь в КМ: Ti-B(волокно) ($Ti+B= TiB_2$), Y₂O₃-Cr (Y₂O₃+Cr= YCr₃), Al₂O₃-Cr (Al₂O₃+Cr= Cr₂O₃ Al₂O₃ (тв. р-р)), где 1 – матрица, 2 – армирующий компонент, 3 – слой, состоящий из продукта реакции

ТЕМА 2. ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА.

В современном производстве литье применяется для получения заготовок длинномерных изделий, станков, тормозов, деталей машин, зубчатых колес, валов, штанг, деталей двигателя внутреннего сгорания и различных изделий машиностроения широкой номенклатуры.

Методом литья можно изготовить изделия самой сложной конфигурации, которые при помощи других способов обработки получить трудно или невозможно. Стоимость литой детали почти всегда ниже стоимости аналогичной детали, изготовленной другими методами.

2.1 Сущность и основные способы литья.

Литье – формообразование из жидкого (расплавленного) металла путем заполнения им полости заданной формы и размеров с последующей кристаллизацией. Продукция литья называется **отливкой**.

Сущность литья сводится к получению жидкого металла нужного химсостава и заливке его в заранее приготовленную литейную форму. В процессе кристаллизации и охлаждения залитого металла формируются основные механические свойства отливки, определяемые макро- и микроструктурой сплава, его плотностью, наличием неметаллических включений, внутренних напряжений и т.п.

В принципе получить отливку можно из любого материала, однако для получения изделий высокого качества применяют сплавы, обладающие необходимыми литейными свойствами: достаточной жидкотекучестью, возможно малой усадкой, однородностью (малой склонностью к ликвации), легкоплавкостью, малой газопоглощаемостью, трещиностойкостью и некоторыми другими.

Жидкотекучесть – способность сплава воспроизводить рельеф литейной формы. При недостаточной жидкотекучести, форма заполняется не полностью (недолив), и отливка бракуется. Высокой жидкотекучестью обладают силумины, серые (литейные) чугуны, кремнистые бронзы.

Усадка – уменьшение сплава в объеме и линейных размерах при затвердевании.

Линейная усадка выражается отношением

$$k = (l_{\phi} - l_{от}) \cdot 100 / l_{от}, \%$$

где l_{ϕ} и $l_{от}$ - размеры формы и отливки соответственно.

Сплавы должны иметь возможно меньшую усадку, т.к. она способствует появлению усадочных раковин, пористости, напряжений, вызывающих коробление отливок и трещины. Линейная усадка в среднем составляет: для серого чугуна 1,0–1,3%, углеродистой стали 1,2–2,4%, легированной стали 2,5–3,0%, силумина 1,0–1,5%, магниевых сплавов 1,0–1,6%, латуни 1,5–1,9%, оловянистых бронз 1,0–1,5%, безоловянистых бронз 1,6–2,2%.

Ликвация — неоднородность химического состава в различных частях отливки. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава и ниже скорости охлаждения, тем больше ликвация. Наименьшая неоднородность свойственна сплавам, имеющим состав, близкий к эвтектическому. Уменьшить ликвацию можно ускоренным охлаждением, а также последующим диффузионным отжигом (гомогенизацией) отливок.

2.2 Литье в песчаные формы

Литье в песчаные формы (литье в землю) – процесс получения отливок путем свободной заливки расплавленного металла в форму, изготовленную из песка с добавлением глины, воды и небольшого количества специальных добавок.

По чертежу отливки в модельном цехе делаются литейные модели и стержневые ящики, размеры которых отличаются от размеров отливки на величину усадки

$$L_{\text{мод}} = l_{\text{от}} + l_{\text{от}} \cdot k/100, \text{ мм},$$

где k – коэффициент усадки сплава в %. Модель предназначена для получения в формовочной смеси отпечатка отливки, а стержневой ящик – для изготовления стержней, формирующих внутренние полости в отливках. В мелкосерийном производстве применяют деревянные модели и ящики; в серийном и массовом – чугунные, силуминовые или пластмассовые.

На рисунке 2.2, показана модель, состоящая из двух половинок, имеющая знаковые части. Знаки модели при формовке образуют углубления, в которых закрепляются песчаные стержни. Стержни, образующие внутреннюю полость отливки, изготавливают в стержневых ящиках (рисунок 2.2, б), сделанных также из двух половинок.

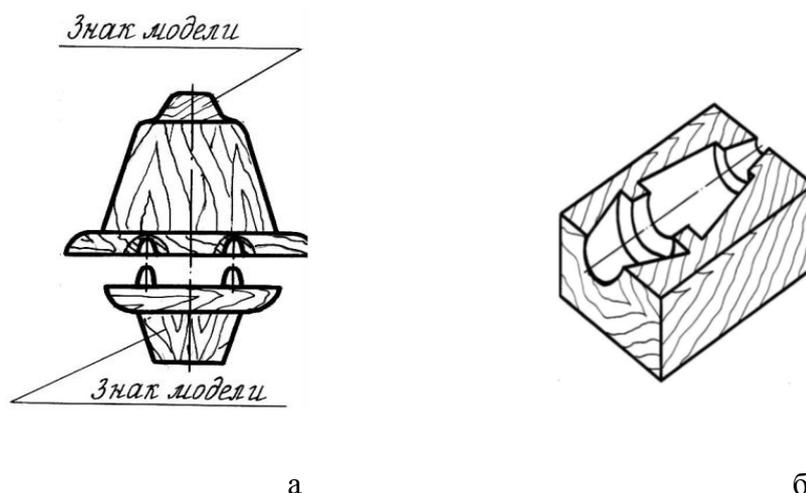


Рисунок 2.2 – Модель отливки (а) и половинка стержневого ящика (б)

После заливки формы и затвердевания отливки литейную форму разрушают, извлекают отливку и освобождают ее и опоки от формовочной смеси.

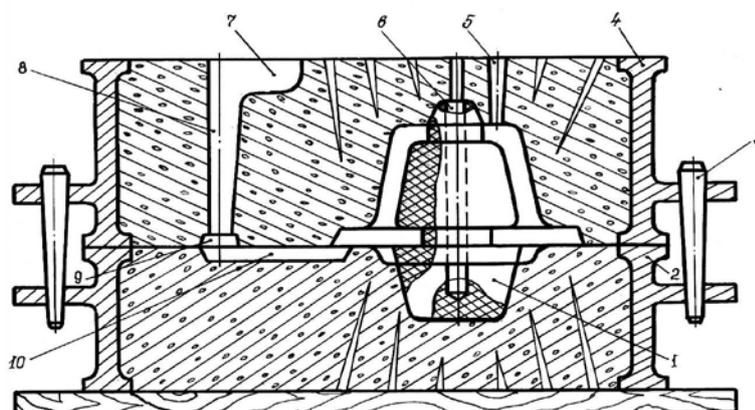


Рисунок 2.3 – Литейная форма в сборе:

- 1 – стержень; 2, 4 – верхняя и нижняя опоки; 3 – штырь; 5 – выпор;
6 – канал для отвода газов; 7 – литниковая чаша; 8 – стояк;
9 – шлакоуловитель; 10 – питатель

Отрезку элементов литниковой системы (стояков, выпоров, питателей и др.) выполняют на фрезерных, шлифовальных станках или газовой резкой.

Для экономии материалов отработанную формовочную смесь и обрезки металла регенерируют.

Основные достоинства процесса – невысокая стоимость технологической оснастки, возможность получать любые по массе и размерам отливки.

Недостатки: низкая точность размеров (14–16 квалитеты); большая шероховатость поверхности (R_z 320 и грубее); крупнозернистая дендритная структура отливки с невысокими механическими свойствами.

2.3 Оболочковое литье

Этот способ является разновидностью литья в разовые песчаные формы. Сущность процесса заключается в том, что форма изготавливается из смеси мелкозернистого кварцевого песка (92–97%) и порошка фенолоформальдегидной (бакелитовой) термореактивной смолы (3–8%). Особенностью этой смеси является ее способность при нагреве до 100–120⁰С плавиться, а при дальнейшем нагреве свыше 160⁰С необратимо затвердевать и образовывать тонкую (6–12 мм), прочную, газопроницаемую оболочку (корку).

Техпроцесс изготовления оболочковых литейных форм бункерным (наиболее производительным) способом складывается из следующего (рисунок 2.4).

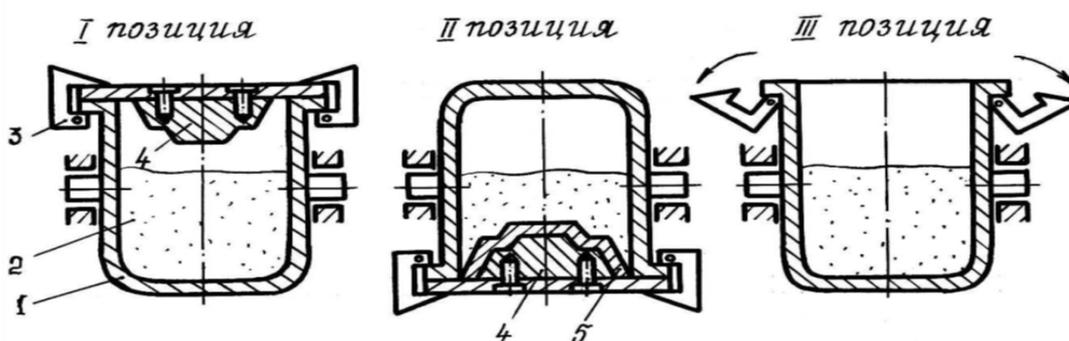


Рисунок 2.4 – Бункерный способ изготовления оболочковых полуформ

Изготавливается металлическая модель 4. Нагретая до 250⁰С модель закрепляется на бункере 1 скобами 3 (позиция I) и поворачивается на 180⁰ (позиция II). Формовочная смесь попадает на нагретую модель. Термореактивная смола плавится и склеивает частички песка, образуя пока еще рыхлую (полусырую) корочку. Толщина оболочки регулируется временем выдержки. Так, за 15–20 с образуется корка толщиной 8–12 мм. Бункер возвращается в исходное положение (позиция III), лишняя формовочная смесь ссыпается вниз, а модель с оболочкой помещается на 2–3 мин в печь, где при температуре 250–300⁰С происходит окончательное спекание оболочки. Аналогично получают вторую полуформу, полуформы склеивают или скрепляют зажимами, предварительно проставив песчаные стержни, и подают под заливку. Крупные оболочки перед заливкой устанавливают в ящики и засыпают дробью или песком.

Для извлечения отливки после затвердевания сплава форму разрушают.

Преимущества литья в оболочковые формы по сравнению с литьем в землю: более высокая точность (12–14 квалитеты) и качество поверхности (R_z 160–40); высокая газопроницаемость оболочек (поскольку нет глины), что существенно снижает брак по газовым пузырям и раковинам; меньше расход формовочной смеси (в 20–30 раз); процесс легко механизировать и автоматизировать; высокая производительность формовки (до 500 оболочек в час).

Недостатки: ограниченная масса отливок (до 300 кг, наиболее экономично до 50–80 кг); большая стоимость формовочных материалов за счет высокой стоимости смолы.

2.4 Литье по выплавляемым моделям

Это один из наиболее точных способов литья. Сущность способа состоит в том, что формовка ведется по модели из легкоплавкого состава (парафин, стеарин, церезин, воск, их

смеси и т.п.), которая покрывается тонкой керамической оболочкой. Впоследствии модель выплавляется, а полость оболочки заливается металлом.

Схема литья по выплавляемым моделям показана на рисунке 2.5.

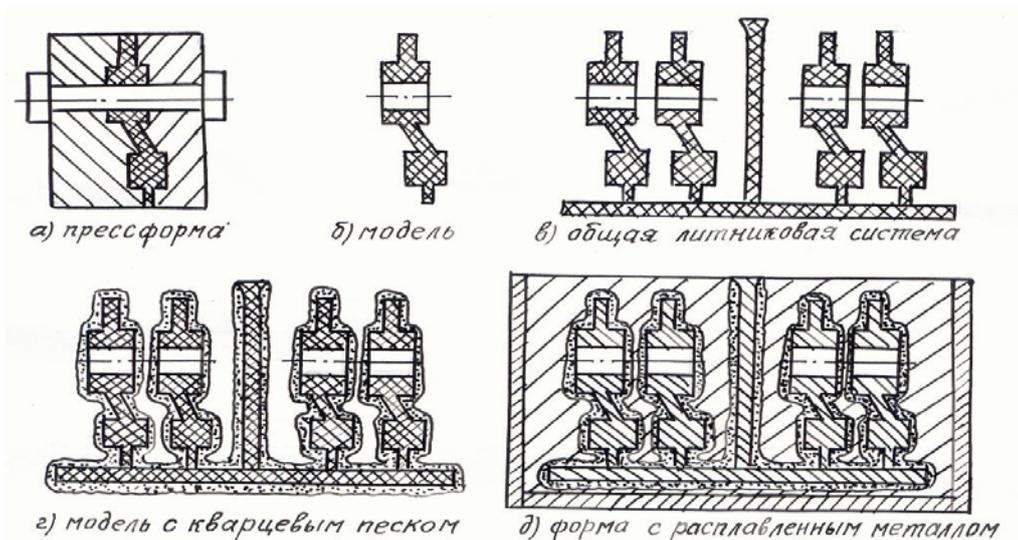


Рисунок 2.5 – Схема литья по выплавляемым моделям

Изготовление моделей производится в стальных пресс-формах (рисунок 2.5, а) путем запрессовки в них модельного состава. Широкое применение нашли составы ПС50-50 (50% парафина и 50% стеарина) и некоторые другие. Температура плавления этих составов 50–58⁰ С. Поверхность пресс-форм подвергают цементации, закалке до HRC 50 и хромированию.

Литейные формы по выплавляемым моделям изготавливают погружением модельного блока в керамическую суспензию, налитую в емкость, с последующей обсыпкой кварцевым песком. Суспензию готовят тщательным перемешиванием огнеупорных материалов (пылевидного кварца, электрокорунда, циркона и др.) со связующим – гидролизированным раствором этилсиликата. После стекания с моделей излишков суспензии их обсыпают кварцевым песком или крошкой шамота в псевдооживленном слое и сушат. Обычно керамическая оболочка состоит из 3–8 последовательно нанесенных слоев общей толщиной от 2 до 6 мм.

Выплавление моделей производят либо в ваннах с горячей водой (85–90⁰ С), либо горячим воздухом (паром). Возврат модельного состава составляет 90–95%.

Готовую форму прокаливают при температуре 850–900⁰ С; при этом остатки модельного состава выгорают, поверхность формы становится гладкой, прочной и твердой.

Формы заливают металлом сразу же после прокаливания (горячими). Для крупных отливок форму помещают в ящик и засыпают песком или дробью.

После затвердевания металла керамическую корку отбивают. Для удаления керамики в отверстиях и внутренних каналах отливки подвергают выщелачиванию при 1200С с последующей промывкой и сушкой.

Основное достоинство рассмотренного способа литья в том, что форма не имеет разъемов и точность размеров отливки будет существенно выше (10–12 квалитеты), чем при литье в песчаные формы, так как здесь исключены основные причины потери точности. Шероховатость поверхности отливки получается низкой благодаря применению кварцевой муки (R_z не более 40 мкм).

Способ трудоемок и дорог, но оправдывается во многих случаях, так как отливки почти не нуждаются в механической обработке (за исключением шлифования).

В промышленности применяют также следующие разновидности способов получения точных отливок:

Литье по выжигаемым моделям. При этом способе модель не выплавляют из формы, а выжигают. Модель изготавливают из пенополистирола и заформовывают. Не извлекая модели, форму заливают жидким металлом. Модель при соприкосновении с расплавленным металлом испаряется и металл занимает то пространство, где была модель.

Литье по растворяемым моделям. В этом случае модель изготавливают из солей (NaNO_3 , KNO_3 и др.). После изготовления литейной формы модель растворяют в воде.

Литье по замороженным моделям. Модель изготавливают из водных растворов солей или ртути. Жидкий раствор заливают в штамп и замораживают. После формовки модель удаляют из формы нагреванием.

2.5 Литье в кокиль

Литье в кокиль – процесс получения отливок путем свободной заливки металла в многократно используемые металлические литейные формы – кокили.

В промышленном производстве литьем в кокиль получают заготовки различных деталей серийного и массового производства.

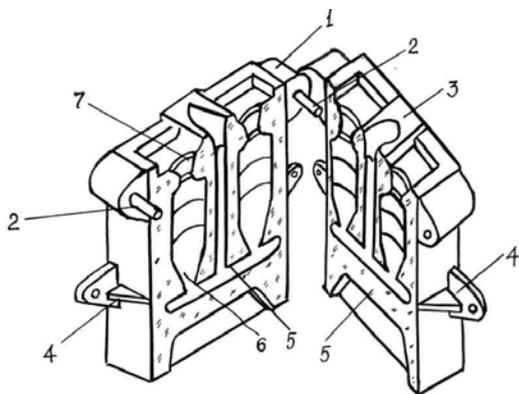


Рисунок 2.6 – Кокиль для отливки корпуса снаряда.

Кокиль представляет собой металлическую (чугунную, стальную) разъемную литейную форму (рисунок 2.6). Точность сборки частей кокиля обеспечивается центрирующими штырями 2; подвод металла в полость формы 6 осуществляется по литнику 5. Заполнение формы металлом контролируется по выпору 7. Газы из формы отводятся через выпор и специальные газовые каналы глубиной 0,2–0,5 мм вдоль разъема формы (на рисунке не показаны). Полости в отливках получают с помощью стержней (песчаных или металлических).

Способ литья в кокиль имеет ряд преимуществ перед литьем в разовые формы: металлическая форма выдерживает большое количество заливок (от нескольких сотен до сотен тысяч в зависимости от температуры заливаемого сплава); высокая точность (11–12 квалитет) и качество поверхности ($R_z 40$); мелкозернистая структура металла отливки, вследствие повышенного теплоотвода формы, что приводит к существенному повышению механических свойств.

Литью в кокиль присущи и некоторые недостатки: большая стоимость формы (особенно сложной); повышенная теплопроводность формы может привести к быстрой потере жидкотекучести сплава (недолив) и получению отбела у чугуна (ледебуритный цементит); при отливке стальных деталей форма имеет невысокую стойкость.

Техпроцесс литья в кокиль состоит из следующих операций:

1. Подготовка кокиля к заливке (обдув сжатым воздухом, нанесение на рабочую поверхность формы слоев облицовки и краски). Огнеупорная облицовка слоем 0,3–0,8 мм наносится через каждые 50–100 заливок; тонкий слой меловой краски – перед каждой заливкой (для повышения стойкости формы).

2. Сборка кокиля с установкой стержней.
3. Нагрев формы до 100–500⁰ С для предотвращения снижения жидкотекучести заливаемого сплава. Практически в процессе работы форма постоянно поддерживается в нагретом состоянии.
4. Заливка металла в форму.
5. Извлечение отливки в горячем состоянии, с помощью выталкивателей или встряхиванием.
6. Обрубка и очистка литья.

Все операции литья в кокиль могут быть механизированы. В обычных литейных машинах механизированы открывание и закрывание форм, установка стержней, выемка (выбивка) отливок.

2.6 Литье под давлением

Литье под давлением – процесс получения отливок в металлических формах (пресс-формах), при котором заливка металла и формирование отливки осуществляются под давлением воздуха или поршня.

Сущность процесса заключается в заливке расплавленного металла в камеру сжатия литейной машины и последующей перегонке его через литниковую систему в полость формы. Заполнение формы происходит при высокой скорости потока (большой кинетической энергии струи), что способствует четкому оформлению поверхностей отливок самой сложной конфигурации.

Данная технология нашла применение благодаря следующим преимуществам: возможность получения сложных (в том числе армированных) отливок с тонкими стенками (от 0,8 мм), с готовыми отверстиями, мелкими резьбами и надписями; высокая точность размеров (8–12 квалитеты) и качество поверхности ($R_z=12,5-2$ мкм); высокая производительность; возможность автоматизации процесса; высокие механические свойства отливок.

К числу недостатков следует отнести: высокую стоимость технологической оснастки; образование пористости в массивных отливках из-за перемешивания жидкого металла с воздухом при высоких скоростях заливки. Поэтому применение рассматриваемого способа литья наиболее целесообразно для получения сложных отливок с тонкими (до 6 мм) стенками, причем наилучшее качество обеспечивается при толщине стенок 1,5–3 мм.

При литье под давлением металлические формы (пресс-формы) по конструкции более сложны, чем кокили. Для образования внутренних полостей в отливках применяются металлические стержни (применение песчаных стержней исключается).

2.7 Основные дефекты литья и их исправление.

ГОСТ устанавливает 22 вида дефектов отливок: **коробление** (искажение формы отливки); **пригар** (прочное соединение поверхности отливки с формовочной смесью); **трещины; раковины газовые и усадочные; рыхлость и пористость** (неплотная структура металла); **механические повреждения отливок** (вмятины и забоины при выбивке и очистке литья); **шлаковые включения; флокены; недолив и др.** Многие отливки, имеющие дефекты, не бракуются, если эти дефекты можно исправить. Применяется целый ряд способов исправления дефектов. Отливки, имеющие коробление или изгиб, подвергаются правке ударами бойка молота, нажатием ползуна пресса и вручную ударным инструментом (молоток, кувалда). Раковины и трещины ремонтируют заливкой жидким металлом, наплавкой или заваркой (дуговой и газовой сваркой). Дефектное место предварительно вырубается. Можно применять также ввертывание пробок. Пористость в отливках устраняется пропиткой пор и пустот самотвердеющими материалами (асфальтовый и бакелитовый лаки, полистирол, жидкое стекло и др.) или замазкой твердеющими пастами.

Тема 3. ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

3.1 Сущность и основные способы

Обработкой металлов давлением (ОМД) называется механическая обработка, заключающаяся в пластическом деформировании или разделении материала без снятия стружки.

В процессе пластического деформирования изменяется структура металла и повышаются его механические свойства, поэтому наиболее тяжело нагруженные детали различных конструкций получают обработкой давлением. В нашей стране примерно 90% всей выплавляемой стали и около половины цветных сплавов подвергаются обработке давлением.

По физической сущности обработка металлов давлением является процессом пластической деформации. Пластическая деформация монокристалла происходит либо путем сдвига (скольжения), либо путем двойникования.

В результате пластической деформации происходит изменение формы зерен. Зерна вытягиваются в направлении деформации и приобретают волокнистое строение с текстурой одинаковой ориентировки кристаллических решеток (рисунок 3.1, в).

Пластическая деформация металла происходит как при холодной обработке давлением, так и при горячей.

С увеличением внешней силы P происходит последовательное смещение частиц зерна. Кроме сдвига частиц зерна происходит и поворот смещенных частей зерна в направлении уменьшения угла между плоскостью скольжения и направлением силы P . Этот поворот объясняется тем, что свободному смещению частей зерна препятствуют соседние зерна. В результате сдвигов и поворотов плоскостей скольжения зерно постепенно вытягивается в направлении силы P и металл приобретает волокнистое строение (рисунок 3.1, в) с анизотропией свойств.

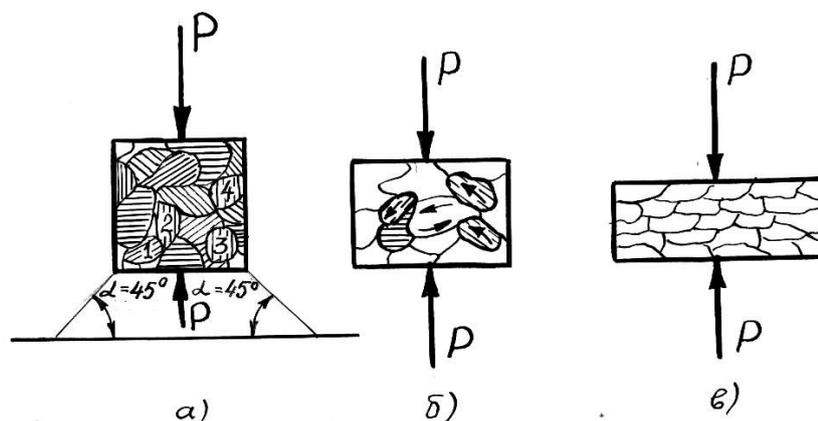


Рисунок 3.1 – Схема развития пластической деформации в поликристалле

При холодной ОМД металл интенсивно упрочняется (наклепывается) и теряет пластичность. При необходимости продолжить обработку давлением заготовку подвергают отжигу. Изделия, полученные холодной деформацией, отличаются высокими прочностными свойствами (благодаря наклепу), точными размерами и гладкой поверхностью. Однако, так можно обрабатывать только весьма пластичные материалы. Холодная ОМД применяется обычно при прокатке тонкого листа, при волочении, при штамповке гильз артиллерийских выстрелов.

Горячая ОМД осуществляется при температурах, превышающих температуру рекристаллизации. При этом деформационное упрочнение (наклеп) полностью снимается,

металл получает равноосную структуру, причем волокнистое строение сохраняется. Чем сильнее нагрет металл, тем выше его пластичность и ниже сопротивление деформированию (в 10–15 раз для углеродистой стали). Однако, нельзя допускать пережога (окисления по границам зерен), который наблюдается вблизи линии солидуса.

Существенное влияние на пластичность и сопротивление деформированию оказывает схема напряжений. Практикой ОМД установлено, что в условиях, отвечающих одноименным схемам со сжимающими напряжениями, пластичность металла всегда выше, чем при одноименных схемах с растягивающими напряжениями.

Основными способами ОМД являются: **прокатка, волочение, ковка, объемная штамповка (ковка в штампах), листовая штамповка, а также некоторые специальные процессы**, например, отделочная и упрочняющая обработка пластическим деформированием. Основные из этих способов будут рассмотрены ниже.

3.2 Нагрев металла и нагревательные устройства

Нагрев заготовок при ОМД производят для повышения пластичности и снижения сопротивления металла деформированию (т.е. энергозатрат). Поскольку в процессе обработки температура заготовки снижается (заготовка остывает), говорят о оптимальном температурном интервале горячей ОМД, который определяют по экстремальным значениям характеристик пластических и прочностных свойств металлических систем.

Верхний предел горячей обработки t_v выбирается таким образом, чтобы не было перегрева, пережога, интенсивного окисления и обезуглероживания (для сталей) нагреваемого металла. Нижний предел – t_n должен быть не ниже температуры мгновенной рекристаллизации во избежание появления наклепа. Основанием для правильного выбора температурного интервала служит диаграмма состояния сплавов. Так, для углеродистых сталей этот интервал показан на диаграмме "железо — углерод" (рисунок 3.2, заштрихованный участок). Верхний предел t_v располагается на 100–200⁰ С ниже линии солидус, а нижний t_n - на 30–50⁰С выше линии GS для доэвтектоидных и на 30–50⁰С выше линии PSK для заэвтектоидных сталей.

Температурный интервал ОМД для легированных сталей характеризуется некоторым сужением с небольшим понижением предельных температур.

Медь обрабатывается в зоне температур 900–700⁰ С, латунь — 760–600⁰ С, бронза — 900–750⁰ С, алюминиевые сплавы — 470–380⁰ С, магниевые — 430–300⁰ С.

Для качества изделий, получаемых горячей обработкой давлением, имеет существенное значение не только режим нагрева, но и режим охлаждения. Слишком быстрое охлаждение может привести к образованию в результате термических напряжений наружных трещин. Чем меньшую теплопроводность имеет сплав и чем больше размер изделия, тем медленнее должно быть охлаждение. Последнее (в порядке увеличения продолжительности) осуществляется: на воздухе; на воздухе в штабелях; в ящиках (ямах) с закрытыми крышками; в закрытых ящиках (ямах) с засыпкой песком, золой, шлаком и т.п.; в печах.

Так, например, поковки из высоколегированной инструментальной стали даже самых малых размеров охлаждаются в печах; крупные поковки из конструкционной стали, начиная примерно с диаметра 500 мм, также охлаждаются в печах.

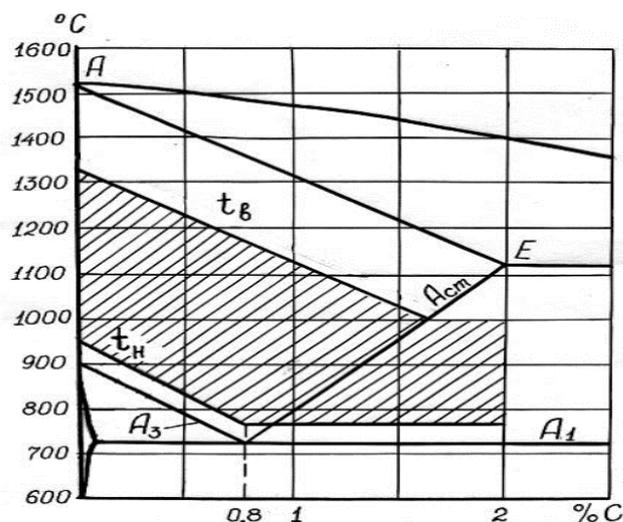


Рисунок 3.2 – Температурный интервал горячей ОМД

В производстве промышленных изделий применяют два способа нагрева заготовок под горячую ОМД: а) прямой, при котором тепло аккумулируется непосредственно в металле (электроконтактный, индукционный); б) косвенный, при котором тепло передается металлу какой-либо средой, нагретой до более высокой температуры (нагрев в пламенной печи, расплавах солей, электролитах).

Наиболее широко применяются камерные печи периодического действия с пламенным нагревом (рисунок 3.3). В них нагревают слитки под ковку штанг, прутков, клиньев и других деталей различной формы. Металл загружается отдельными партиями (садками). После нагрева до требуемой температуры заготовки последовательно вынимают и деформируют. После обработки всей партии заготовок в печь загружают следующую садку.

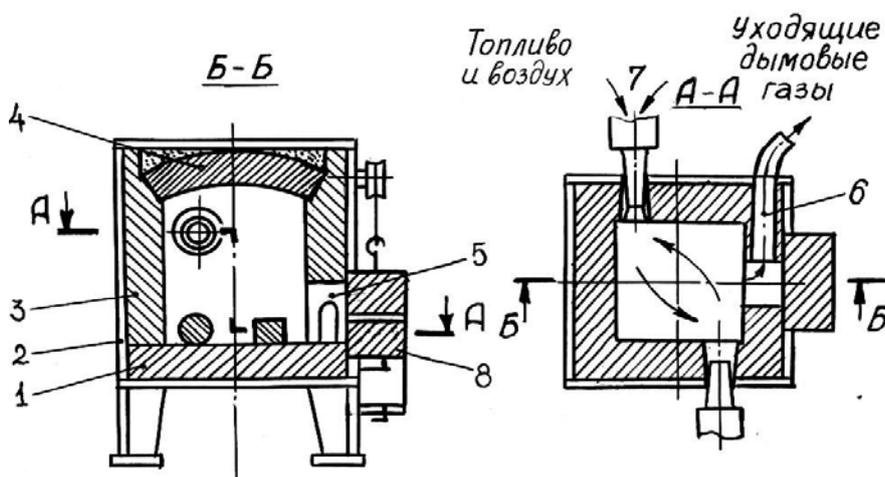


Рисунок 3.3 – Схема камерной печи: 1 – под; 2 – кожух; 3 – стенки; 4 – свод; 5 – окно; 6 – канал; 7 – форсунки; 8 – заслонка

Печь состоит из металлического каркаса 2, выложенного внутри огнеупорным кирпичом из шамота. В боковой стенке расположено окно 5 для загрузки и разгрузки печи; оно закрывается массивной чугунной заслонкой 8. Сжигание топлива (мазут, горючий газ, пылевидный кокс) производится при помощи горелок или форсунок 7. Раскаленные газы, отдавшие тепло металлу, размещенному на поду I, уходят через канал 6.

Прогрессивным способом нагрева является электрический. Основные виды электронагрева: **индукционный, контактный и в печах сопротивления.**

Сущность индукционного нагрева состоит в том, что через индуктор — катушку из витков медной трубки, в которой циркулирует вода для охлаждения, пропускается переменный ток повышенной или промышленной частоты. Вокруг витков катушки возникает переменное магнитное поле, которое создает в стальной заготовке, помещенной в индуктор, вихревые токи, быстро нагревающие металл до требуемой температуры.

При контактном нагреве к концам заготовки через медные контакты-зажимы подводят переменный ток силой в десятки тысяч ампер, напряжением от 2 до 15 вольт.

Электropечи сопротивления оборудованы металлическими спиралями из нихромовой ленты или карборундовыми нагревателями, через которые пропускают ток. Тепло от нагревателей передается заготовкам атмосферой и стенками печи. В таких печах температура не превышает 1000°C , их применяют для нагрева заготовок из цветных металлов и сплавов.

3.3 Прокатка

Сущность процесса. Прокаткой называется процесс деформации металла путем обжатия его между двумя вращающимися валками. При этом происходит уменьшение толщины заготовки (обжатие), увеличение ширины (уширение) и увеличение длины (вытяжка). Прокатка является одним из самых производительных способов ОМД и применяется преимущественно для получения стандартных заготовок и полуфабрикатов для дальнейшей их обработки.

В настоящее время прокатке подвергаются до 80% всей выплавляемой стали и около 50% цветных сплавов. Заготовки, полученные прокаткой, находят широкое применение в промышленности. Прокаткой изготовляют листы броневой защиты, заготовки для осей, подавляющее большинство заготовок для изготовления деталей ковкой, штамповкой, сваркой, резанием.

Выделяют три основных вида прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую.

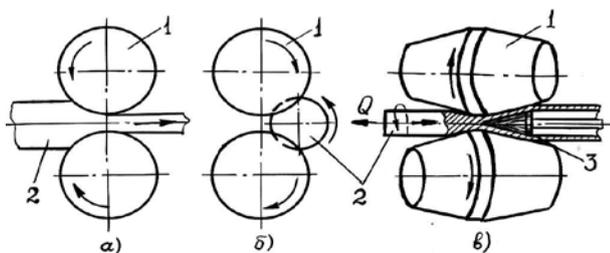


Рисунок 3.4 – Основные виды прокатки:
1 – валки; 2 – заготовка; 3 – оправка (игла)

При продольной прокатке (рисунок 3.4, а) заготовка 2 деформируется между валками 1, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно к осям валков.

При поперечной прокатке (рисунок 3.4, б) валки 1, вращаясь в одном направлении, придают вращение заготовке 2 и деформируют ее.

При поперечно-винтовой (косой) прокатке (рисунок 3.4, в) валки расположены под углом и сообщают заготовке при деформировании вращательное и поступательное движения.

Сортамент проката. В нашей стране почти все изделия, изготавливаемые прокаткой, стандартизованы. В стандартах приведены размеры, площадь поперечного сечения и масса погонного метра профиля. Для балок, швеллеров и уголков дополнительно стандартизированы: момент сопротивления, момент инерции, радиус инерции.

Совокупность различных профилей с разными размерами называется сортаментом проката. Сортамент прокатываемых профилей разделяется на четыре основные группы: сортовой, листовой, трубный и специальный.

Сортовой прокат условно делят на простой (круг, квадрат, шестигранник, прямоугольник) и фасонный (тавр, двутавр, рельс, уголок, швеллер и др.). Круглую и квадратную сталь прокатывают соответственно с диаметром или стороной квадрата 5–250 мм; шестигранную — с диаметром вписанного круга 6–100 мм; полосовую — шириной 10–200 мм и толщиной 4–60 мм. Цветные металлы и их сплавы прокатывают преимущественно на простые профили.

Листовой прокат разделяют на тонколистовой (толщиной до 4 мм) и толстолистовой (толщиной 4–160 мм). Листы толщиной менее 0,2 мм называют фольгой. Расширяется производство листовой стали с оловянным, цинковым, алюминиевым и полимерным покрытиями.

Трубы разделяют на бесшовные и сварные. Бесшовные трубы прокатывают диаметром 30–650 мм с толщиной стенки 2–160 мм, а сварные — диаметром 5–2500 мм с толщиной стенки 0,5–16 мм.

К специальным видам проката относят колеса, кольца, шары, профили с периодически изменяющимися формой и площадью поперечного сечения вдоль оси заготовки. Примеры профилей сортового проката показаны на рисунке 3.5.

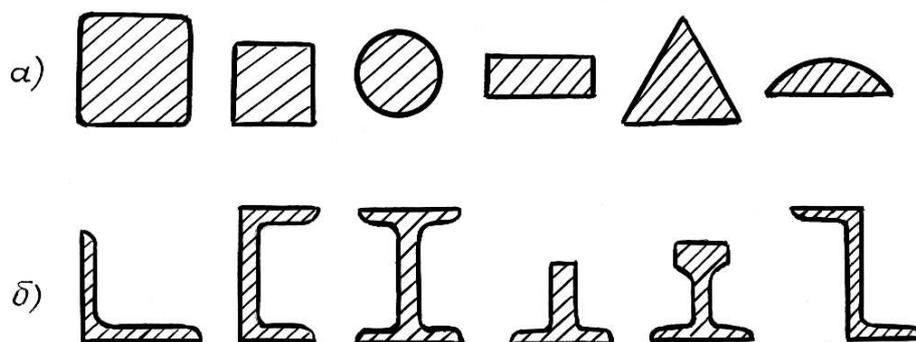


Рисунок 3.5 – Некоторые профили сортового проката:
а – простого, б – фасонного профиля

Прокатные станы. Оборудование, на котором прокатывается металл, называется прокатным станом. Прокатный стан состоит из одной или нескольких рабочих клеток, передаточного механизма и двигателя. Кроме того, современные прокатные станы оснащены вспомогательными механизмами для механизации процесса прокатки.

По числу и расположению валков в рабочей клетке различают следующие группы станков:

дуо - станы — с двумя валками в каждой клетке: нереверсивные, имеющие постоянное направление вращения, и реверсивные, в которых металл можно пропускать в обе стороны;

трио - станы — с тремя валками в каждой клетке. В одну сторону заготовку пропускают между нижним и средним, а другую — между средним и верхним валками;

многовалковые — с четырьмя (кварто-станы), шестью (сексто-станы) и большим (до 20) количеством валков. Рабочими являются только два валка, остальные — опорные;

универсальные — имеющие не только горизонтальные, но и вертикальные валки.

По назначению прокатные станы делятся на следующие виды:

обжимные, служащие для предварительного обжатия слитков в крупные заготовки. К ним относятся блюминги и слябинги. Блюминг представляет собой мощный реверсивный дуо-стан; на нем производят квадратную заготовку (блюм), подвергаемую дальнейшей прокатке для

получения сортовых профилей. Слябинг — мощный универсальный двухклетевой стан (первая клеть имеет вертикальные валки, вторая — горизонтальные), предназначен для получения прямоугольного проката (слябов), представляющего собой заготовки для листа;

заготовочные станы предназначены для проката блюмов и слябов в сортовую квадратную заготовку и плоскую заготовку (сутунку) сечением меньше, чем слябы. Эти заготовки используют для последующей прокатки в мелкие листы и ленту;

рельсобалочные станы — для прокатки рельсов, крупных балок, швеллеров и других профилей;

сортовые станы предназначены для получения сортового проката. Делятся на крупно-, средне- и мелкосортные;

листопрокатные станы;

трубопрокатные станы служат для производства бесшовных и сварных труб. На рисунке 3.8 показана схема прошивки отверстия в сплошном материале при получении заготовки трубы. В качестве исходной заготовки используют круглый прокат. Прошивной стан имеет два рабочих валка диаметром 450–1000 мм с двойной конусностью. Оси валков в вертикальной плоскости наклонены друг к другу под углом 4–140. Оба валка вращаются в одном направлении.

3.4 Волочение

Волочением называется процесс ОМД, заключающийся в протягивании исходной заготовки через очко специального инструмента — волоку, имеющую рабочее отверстие меньше, чем поперечное сечение заготовки. При этом площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина ее увеличивается. Коэффициент вытяжки подсчитывается по формуле:

$$\mu = F_0 / F$$

Величина μ в первых и последних проходах составляет 1,15–1,25, при промежуточных — до 1,45.

Схемы волочения показаны на рисунке 3.6. Передний конец исходной заготовки перед волочением заостряется с тем, чтобы он прошел через отверстие волоки и его можно было захватить тянущим устройством. Для уменьшения трения при волочении применяют обильную смазку, различные предварительные покрытия заготовок, например, меднение, которое снижает коэффициент трения, а также предохраняет поверхность от задиранья.

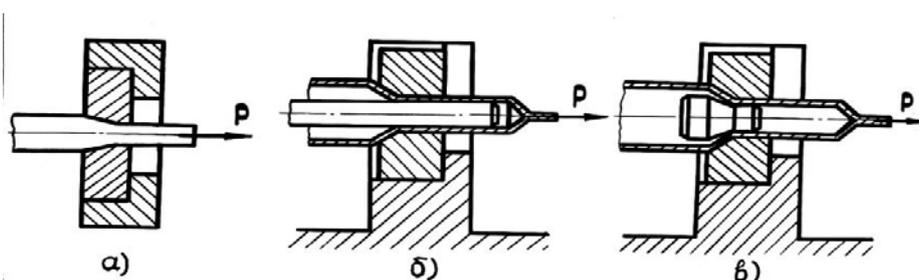


Рисунок 3.6 – Схемы волочения: а – прутка; б – трубы на длинной оправке; в – трубы на плавающей оправке

Инструментом для волочения служат волочильные доски и волоки (фильеры). Волока (или фильер) представляет собой кольцо (рисунок 3.7, а), рабочее отверстие которого состоит из входного конуса 1, деформирующей зоны 2, калибрующего пояса 3 и выходного конуса 4.

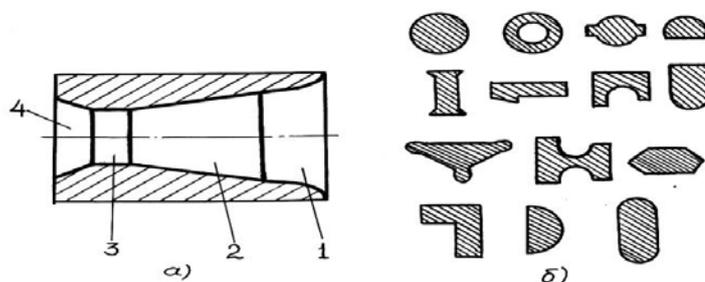


Рисунок 3.7 – Разрез волокни (а) и примеры профилей, полученных волочением (б)

Материалом для них служат инструментальные стали У7, У12, Х12М, твердые сплавы ВК3, ВК6 и другие. Отверстия в волокнах из твердых сплавов изготавливаются электроискровым методом. Полировка отверстий производится на станках с помощью специальных игл и абразивных порошков. Волоки для проволоки диаметром менее 0,2 мм изготавливают из технических и естественных алмазов.

Технологический процесс волочения состоит из следующих операций: 1) предварительный отжиг заготовок для получения мелкозернистой структуры металла (сорбит) и повышения его пластичности; 2) травление заготовок в подогретом растворе серной кислоты для удаления окалины; 3) промывка заготовок и нейтрализация травильного раствора; 4) заострение концов заготовок в ковочных вальцах; 5) волочение; 6) отжиг для устранения наклепа; 7) отделка готовой продукции (обрезка концов, правка, резка на мерные длины).

Оборудование для волочения называют волочильными станами. В основном применяются два типа станов: цепные и барабанные.

3.5 Ковка

Сущность и области примененияковки. Ковка — процесс деформирования горячей заготовки между бойками молота или прессы. При этом течение металла происходит в направлениях, не ограниченных поверхностями инструмента, поэтому ее называют свободной. Ковкой достигается не только требуемая форма поковок, но и значительно улучшаются ее первоначальные свойства и структура.

Ковка делится на ручную и машинную. Ручная ковка применяется для ремонта вооружения в полевых условиях. В состав подвижных ремонтных органов входит кузнечный пост для обработки поковок массой до 2 кг (нагревательный горн, наковальня и кузнечный инструмент). Машинная ковка, осуществляемая на кузнечно-прессовом оборудовании, является основным методом, применяемым на заводах основного производства.

К преимуществамковки по сравнению с другими способами ОМД относятся: ее универсальность в отношении массы, формы и размеров заготовки; отсутствие затрат на дорогостоящую технологическую оснастку; возможность использования маломощных машин-орудий благодаря концентрированному приложению усилийковки бойками в небольшом объеме деформируемого металла.

Технологические операцииковки. Получение любойковки возможно последовательным применением элементарных операций: осадки, протяжки, раскатки, закручивания, гибки, рубки, прошивки и некоторых других. Основные технологические операции свободнойковки показаны на рисунке 3.8.

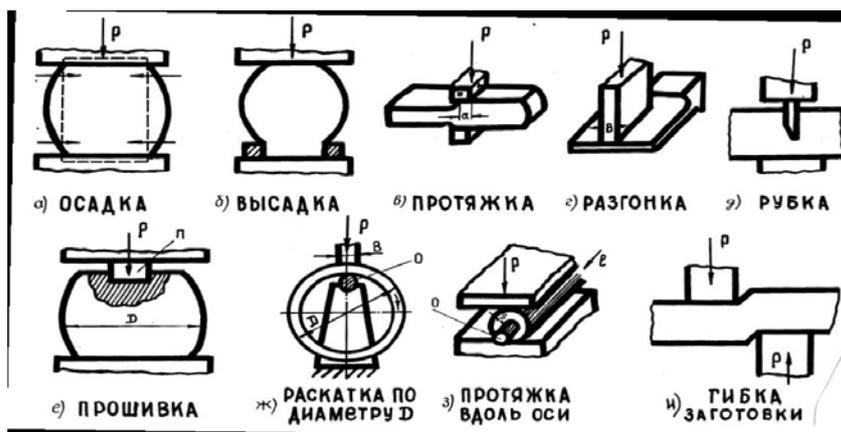


Рисунок 3.8 – Основные операцииковки

Осадка — увеличение площади поперечного сечения заготовки за счет уменьшения ее высоты. Разновидностью осадки является высадка — местная осадка для получения утолщений, головок болтов, фланцев и т.п.

Протяжка — удлинение заготовки за счет уменьшения поперечного сечения. Разновидности: вытяжка на оправке и раскатка на оправке — для обработки полой поковки, например, заготовки штанги.

Гибка — придание заготовке изогнутой формы по заданному контуру.

Закручивание — поворот части поковки вокруг продольной оси (изготовление коленвалов, сверл и т.п.).

Рубка — отделение одной части заготовки от другой или удаление излишков металла (вырубка).

Прошивка — получение отверстий в сплошной заготовке.

Ковка в подкладных штампах применяется при изготовлении партии одинаковых поковок небольших размеров (гаечные ключи, болты и т.п.).

Инструмент дляковки. Технологический процессковки осуществляется при помощи различных инструментов и приспособлений. Кузнечный инструмент делится на основной, вспомогательный и мерительный.

К основному относится инструмент (рисунок 3.9), с помощью которого заготовке придается требуемая форма: а) бойки — плоские, скругленные и вырезные; б) обжимки — для отделочных операций; в) раскатки — для создания углублений и для расплющивания; г) топоры — для рубки и вырубки; д) прошивки — для прошивания отверстий.

Вспомогательный — инструмент для захвата, перемещения и вращения заготовки (клещи, патроны, воротки, лебедки и т.п.).

Мерительный — инструмент для контроля размеров и формы поковок (кронциркули, линейки, угольники, шаблоны и пр.).

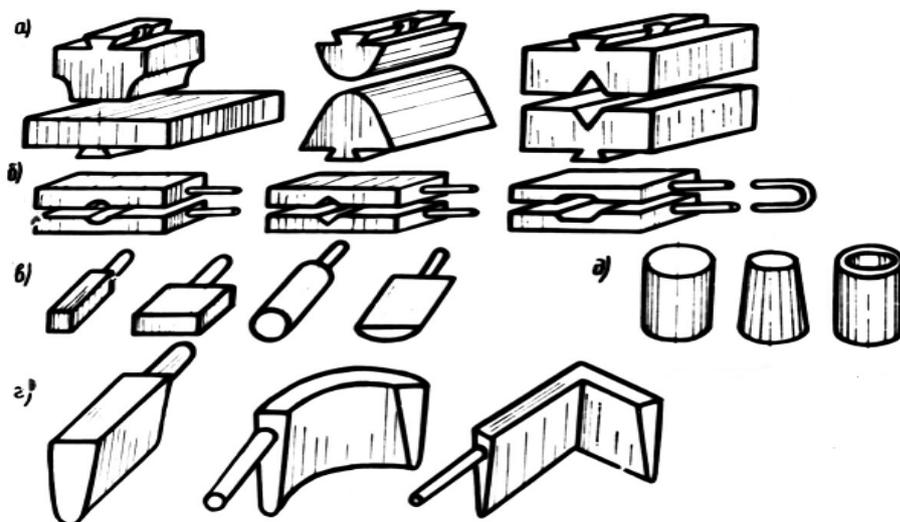


Рисунок 3.9 – Основной кузнечный инструмент

Ковочное оборудование. Машины для свободной ковки делятся на две группы: динамического действия (молоты) и статического действия (прессы).

Молоты деформируют металл ударом. Основными видами молотов, применяемых в настоящее время для ковки, являются пневматические и паровоздушные. Достоинством молотов является лучшее качество поверхностей поковок, так как при ударах хорошо отбивается окалина. Однако молоты большой мощности сильно сотрясают почву, требуют мощных фундаментов, создают большой шум. Поэтому на молотах куют поковки массой не более 1–5 тонн. Прессы приводятся в действие с помощью жидкости (воды, масла) и развивают усилия до 10000 тонн. На этих прессах можно ковать поковки массой до 250 тонн и более. Достоинством прессов являются: большие мощности, бесшумность работы и высокий КПД.

Разработка технологического процесса ковки включает:

1. Составление чертежа поковки по чертежу детали с учетом припусков на последующую обработку, допусков и, в случае необходимости, напусков.
2. Расчет размеров и массы заготовки по номинальным размерам, обозначенным на чертеже поковки. Объем заготовки из проката определяется по формуле

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{пок}} + V_{\text{м.от.}} + V_{\text{уг}},$$

В среднем можно принимать $(V_{\text{м.от.}} + V_{\text{уг}})$ равными 10–12% от объема заготовки.

3. Выбор кузнечных операций и установление их последовательности с указанием основного, вспомогательного и мерительного инструмента.
4. Установление режима нагрева и выбор нагревательного устройства.
5. Выбор кузнечного оборудования и его мощности.

3.6 Штамповка

По видам штамповка делится на: а) горячую и холодную; б) объемную и листовую. Объемная штамповка может быть горячей и холодной (для окончательного придания точности формы и размеров), а листовая – как правило, производится только в холодном состоянии.

Объемная штамповка (ковка в штампах) - процесс деформирования заготовки в стальных формах — штампах. При объемной штамповке течение металла ограничивается поверхностями полостей штампа. При смыкании штампа металл заполняет полость (ручей), и образуется изделие — поковка (рисунок 3.10).

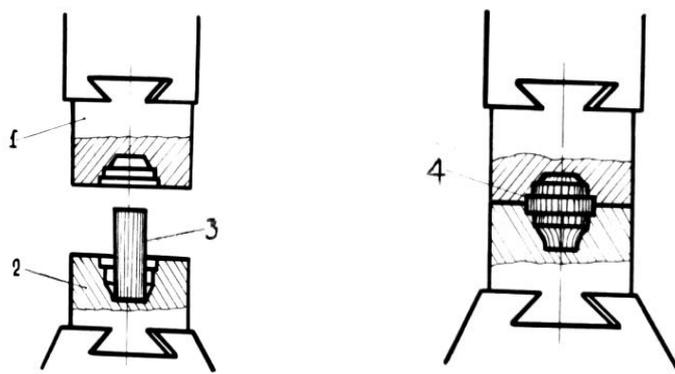


Рисунок 3.10 — Схема штамповки в одноручьевом штампе:
1, 2 — верхняя и нижняя части штампа; 3 — заготовка; 4 — поковка

По сравнению со свободной ковкой объемная штамповка имеет **ряд преимуществ**:

1. Высокая производительность — в десятки раз больше, чем при свободной ковке.
2. Однородность и точность получаемых поковок. Допуски при горячей штамповке в 3–4 раза меньше, чем при свободной ковке. После холодной калибровки допуски могут достигать $\pm 0,1$ мм и даже $\pm 0,05$ мм, а качество поверхности можно получить такое, что не требуется в ряде случаев обработки резанием.
3. Возможность получения деталей очень сложной формы, совершенно не поддающихся изготовлению свободной ковкой без напусков.
4. Необходимая квалификация рабочей силы при изготовлении деталей штамповкой значительно ниже, чем при свободной ковке.

Штамповке свойственны и **некоторые недостатки**:

1. Ограниченность штампованных изделий по массе. В настоящее время преимущественно штамповкой изготавливают изделия массой до 100 кг, однако штамповочное производство непрерывно развивается в направлении увеличения массы поковок. Иногда изготавливают поковки массой до 2 тонн.
2. Высокая стоимость штампа, который в отличие от универсального инструмента свободнойковки является узкоспециализированным, то есть годным для изготовления только одной определенной поковки. Поэтому штамповка выгодна лишь в серийном и массовом производстве.

В качестве исходного материала применяется сортовой прокат, прессованные прутки, литая заготовка. В крупносерийном производстве часто применяется прокат периодического профиля, что сокращает подготовительные операции.

В зависимости от сложности получаемого изделия и вида применяемой заготовки штамповка может быть одноручьевой или многоручьевой.

При многоручьевой штамповке заготовка штампуются последовательно в нескольких ручьях. Каждый ручей имеет определенное назначение, и их разделяют на следующие виды:

1. Штамповочные: чистовой (окончательной) и предварительный (черновой).
2. Заготовительные: протяжной, подкатной, формовочный, гибочный.
3. Отрезной (нож).

Окончательный ручей имеется во всяком штампе; остальные ручьи применяются в тех или иных комбинациях в зависимости от конфигурации поковки.

Окончательный ручей служит для получения готовой поковки и представляет собой точное отображение последней, но с размерами, большими на величину усадки металла. Вокруг открытого чистового ручья имеется канавка для заусенца.

На рисунке 3.11 показан многоручьевой штамп. Нагретая исходная заготовка вначале поступает в протяжной ручей 2, в котором протягивают ее середину, потом заготовку

обрабатывают в подкатном ручье 1 с целью набора металла на концах, после чего передают в гибочный ручей 4 и затем штампуют в предварительном и окончательном 3 ручьях штампа.

Штампы для горячей штамповки работают в очень тяжелых условиях. Поэтому штамповая сталь должна обладать высокими механическими свойствами: прочностью, ударной вязкостью, твердостью и сохранять эти свойства при повышенных температурах. Кроме того, нужны износостойкость и хорошая обрабатываемость резанием. Штампы изготавливают из специальных сталей 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНТ, Х12Ф, Х12М и др.

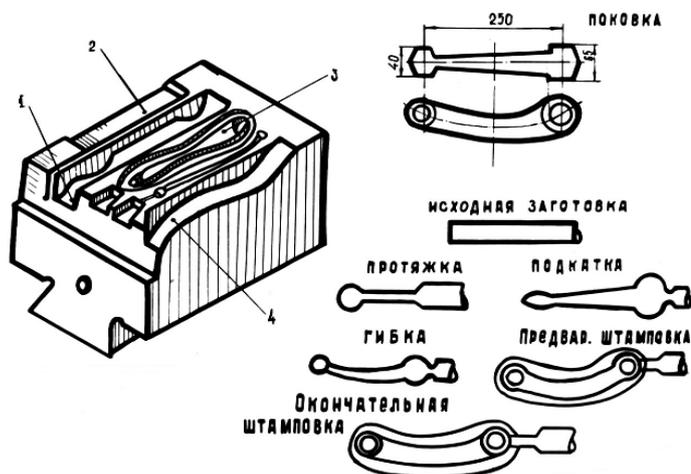


Рисунок 3.11 – Многоручьевого молотовой штамп

Штамповка так же, как и ковка может производиться на молотах и прессах.

Достоинства молотов: большая универсальность, меньшая стоимость оборудования, хорошо отделяется окалина от удара.

Достоинства прессов: повышенная точность из-за отсутствия ударной нагрузки; большая производительность за счет того, что штамповка осуществляется за один ход ползуна, а не за несколько ударов на молоте; большая безопасность работы и отсутствие сотрясений почвы; ниже требуемая квалификация рабочего.

Листовая штамповка — способ изготовления тонкостенных изделий из листового материала, ленты или полосы с помощью штампов. Листовой штамповкой обрабатывают все технические металлы и их сплавы, картон, пластмассы, кожу и другие материалы. Очень много разнообразных по конфигурации деталей можно получить, совмещая в технологическом процессе листовую штамповку и сварку. Так получают детали различных изделий машиностроения: направляющие машин, корпуса сложной формы, бензобаки, баллоны, картеры, поддоны и т.д.

Операции листовой штамповки можно разделить на две группы: разделительные, в которых одну часть заготовки отделяют от другой (отрезка, вырубка, пробивка) и формоизменяющие, в которых происходит перемещение одной части заготовки относительно другой без разрушения (гибка, вытяжка, формовка, обжим, отбортовка, закатка, правка и некоторые другие). Рассмотрим основные из этих операций. Отрезка — отделение части заготовки по незамкнутому контуру. Осуществляется на ножницах с параллельными ножами, гильотинных и дисковых. Вырубка — отделение части заготовки по замкнутому контуру, причем отделяемая часть является изделием (рисунок 3.15, а). Пробивка — отделение части заготовки по замкнутому контуру, причем отделяемая часть является отходом. Эти две операции, отличающиеся только по назначению, осуществляются при помощи штампа, состоящего из пуансона 1 и матрицы 2. Гибка — придание плоской заготовке изогнутой формы по заданному контуру. (рисунок 3.15, б) Отбортовка — образование борта (горловины) по внутреннему или наружному контуру листовой заготовки. (рисунок 3.15, в) Вытяжка — образование полых детали из плоской заготовки (рисунок 3.15, г). Во избежание образования

складок осуществляют вытяжку с прижимом. Если за одну вытяжную операцию изделие получить невозможно, применяют несколько последовательных вытяжек. Между операциями производят отжиг, травление для снятия окалины, промывку и сушку. Сущность операций обжима и раздачи ясна из рисунка 3.12, д, е. Формовка — операция, дающая местное изменение формы. Формовку применяют при изготовлении ребер жесткости средней части полого изделия и т.п. Формовку осуществляют с помощью резиновых вкладышей, жидкости, взрывом и т.д. Некоторые схемы формовки показаны на рисунке 3.13. В качестве машин — орудий при листовой штамповке применяют различные прессы — кривошипные, фрикционные, гидравлические.

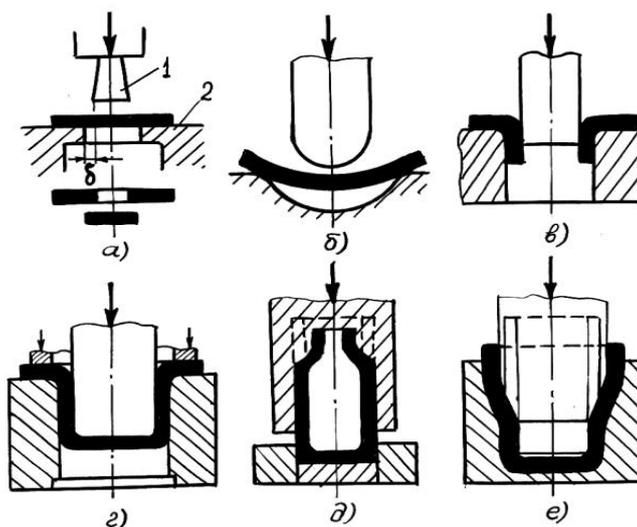


Рисунок 3.12 – Операции листовой штамповки: а – вырубка и пробивка; б – гибка; в – отбортовка; г – вытяжка;

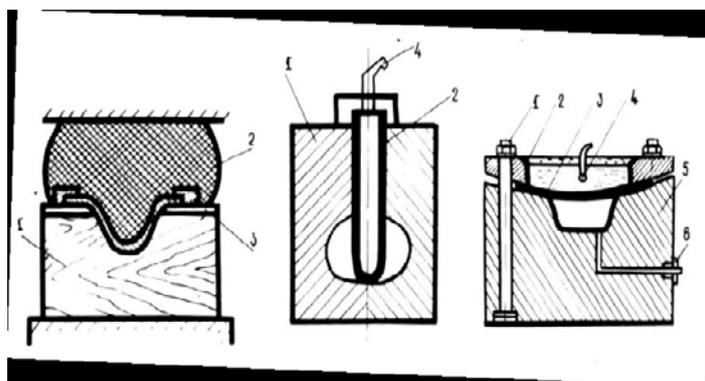


Рисунок – 3.13 – Схемы формовки: а – резиной; б – жидкостью (газами); в – взрывом.

Все прессы можно разделить на прессы простого и двойного действия. У прессов простого действия имеется только один ползун, на котором укрепляется пуансон. Такие прессы используются для вырубki, прошивки, гибки и простой вытяжки.

Прессы двойного действия имеют два ползуна. Наружный ползун обеспечивает прижим листовой заготовки, внутренний главный ползун выполняет основную операцию штамповки (вытяжку, гибку или формовку). Основным инструментом при листовой штамповке является штамп, который состоит из рабочих элементов (пуансона и матрицы) и ряда вспомогательных устройств (рисунок 3.14).

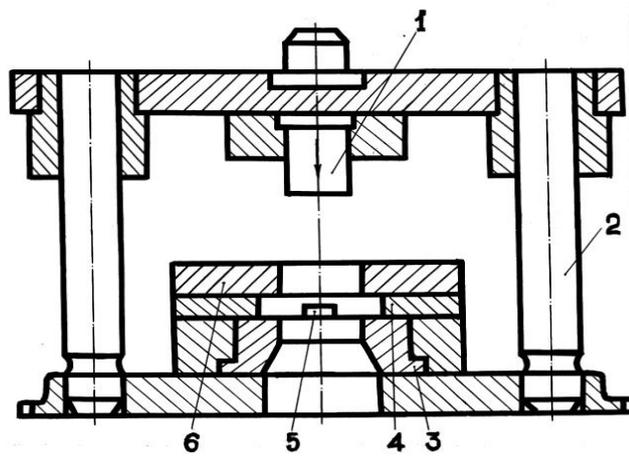


Рисунок 3.14 – Штамп для вырубки: 1 – пуансон; 2 – направляющие колонки; 3 – матрица; 4 – планки; 5 – упор; 6 – съемник.

3.7 Ротационное обжатие

Ротационным обжатием (редуцированием) называют способ формообразования давлением сплошных и полых деталей — тел вращения переменного сечения вдоль оси. Редуцирование методом ротационного обжатия осуществляется как в горячем, так и в холодном состоянии. По сравнению с обработкой резанием метод ротационного обжатия имеет значительные преимущества, так как обеспечивает экономию металла на 5–25%, повышает производительность в 20–30 раз и повышает исходные прочностные показатели до 50%.

Ротационное обжатие осуществляется на специальных ротационно-обжимных машинах. Схема головки одношпиндельной ротационно-обжимной машины с одной парой матриц показана на рисунке 3.15, а, б, а общий вид на рисунке 3.15, в. Головка, закрепленная неподвижно в корпусе станины, имеет в передней части отверстие, в которое запрессовано закаленное кольцо. Между кольцом и шпинделем 3 помещена обойма 4 с четным числом роликов 2. Боковые поверхности роликов частично выступают со стороны внутренней поверхности обоймы. Шпиндель 3, вращающийся с определенной скоростью, имеет диаметральный паз, по которому бойки с матрицами 5 совершают возвратно-поступательные движения в радиальном направлении.

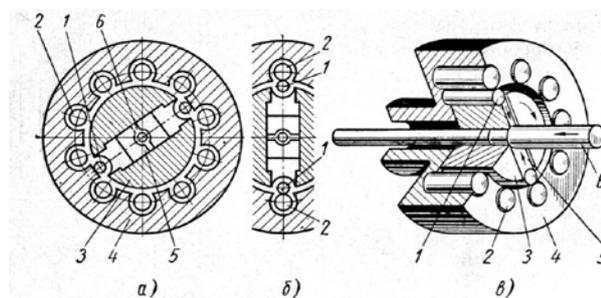


Рисунок 3.15 – Схема ротационно-обжимной машины

Точность размеров при редуцировании соответствует 6–8 квалитетам, а шероховатость поверхности — $R_z = 2,5-0,8$ мкм.

ТЕМА 4. ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ, ПАЙКИ И СКЛЕИВАНИЯ.

4.1 История развития сварочного производства

Сварка широко применяется в современном машиностроении, в строительстве и других отраслях народного хозяйства для соединения металлов и сплавов между собой и с неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и т.п.). По данным ремонтных предприятий сварка занимает до 30% объема всех ремонтных работ. Широкое применение сварки обусловлено целым рядом ее преимуществ по сравнению с другими способами неразъемного соединения. Например, при замене клепаных конструкций сварными расход металла сокращается на 15–30%, значительно снижается стоимость и трудоемкость работ, резко повышается производительность. Многие литые или кованные изделия можно заменить более легкими сварными; при этом экономия металла может достигать 40–50% от массы изделия.

Использование простейших способов сварки (типа кузнечной и литейной) началось еще в глубокой древности. Однако бурное ее развитие началось в конце XIX – в начале XX веков, когда появились эффективные средства нагрева металла: электрическая дуга, термитные смеси, ацетилено-кислородное пламя, плазма, электронный луч, лазер и т.п. Родиной современных способов сварки по праву считается Россия. В 1802 г. академик В.В. Петров открыл явление электрической дуги. В 1881 г. русский инженер Н.Н. Бенардос разработал способ сварки угольным электродом; в 1888 г. Н. Г. Славянов предложил способ дуговой сварки металлическим электродом. Они же разработали практически все способы контактной сварки.

Нашими космонавтами (В. Кубасов, Г. Шонин, С. Савицкая) впервые была осуществлена сварка на околоземной орбите материалов, которые в земных условиях сваривать трудно или невозможно.

4.2 Физические основы сварки

Сварка – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями металла при их нагреве или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого. Сварка – это металлургический процесс, основанный на закономерностях термодинамики, физических и химических превращениях как в самом сварном шве, так и в околошовной зоне. Принципиальная сущность сварки очень проста. Поверхностные атомы куска металла имеют свободные, ненасыщенные связи, которые захватывают всякий атом, приблизившийся на расстояние действия межатомных сил ($\sim 4 \cdot 10^{-8}$ см). Процесс соединения теоретически происходит спонтанно (самопроизвольно), без затрат энергии и практически мгновенно. Свободные атомы имеют избыток энергии по сравнению с атомами конденсированной системы и поэтому соединение атомов должно сопровождаться освобождением энергии. Такое самопроизвольное объединение атомов наблюдается в объемах однородной жидкости, а также в условиях высокого вакуума не ниже $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Такие естественные условия имеются в космическом пространстве, где металлы свариваются (схватываются) при случайных соприкосновениях. Несравненно труднее происходит объединение объемов твердого вещества при нормальных условиях в атмосфере. Соединению твердых металлов мешают прежде всего:

а) **твердость**, не дающая возможности сблизить объемы металла по всей поверхности соприкосновения (соприкосновение происходит лишь в немногих физических точках даже на тщательно подогнанных поверхностях и разрушается действием упругих сил при снятии давления);

б) **загрязнения поверхности** металла: оксиды, жировые пленки, а также слои адсорбированных молекул газов, образующиеся на свежечищенной поверхности практически мгновенно под действием атмосферы.

Для борьбы с этими затруднениями техника использует два основных средства: нагрев и давление. При **нагреве** снижается твердость металла и возрастает его пластичность, что позволяет соединять металлы при сравнительно небольшом давлении. Если довести металл до расплавленного (жидкого) состояния, то отпадают все трудности, связанные с твердостью – объемы жидкого металла самопроизвольно сливаются в общую сварочную ванну. **Давление** создает значительную пластическую деформацию металла (у достаточно пластичных металлов), и он начинает течь подобно вязкой жидкости. Металл должен течь вдоль поверхности раздела, унося поверхностный слой с загрязнениями и пленками оксидов и газов. С повышением температуры пластичность повышается, необходимое давление снижается, поэтому часто применяют оба эти фактора совместно (нагрев и давление). Вообще возможны различные соотношения: от расплавления металла при отсутствии давления вплоть до сварки только давлением без нагрева (холодная сварка).

Средством для очистки поверхности служат флюсы, растворяющие оксиды при повышенных температурах. Кроме того, принимают меры для уменьшения загрязнения металла в процессе сварки (флюсы, шлаки, защитные газы, вакуум).

4.3 Классификация способов сварки

Классификацию способов сварки осуществляют по различным признакам (ГОСТ 19521-74): по форме энергии, способу защиты металла в зоне сварки, степени механизации или автоматизации и др. В практике сварочного производства принято все существующие способы сварки делить на две большие группы: 1) сварка плавлением (объединяет все способы, основанные на местном расплавлении металла по соединяемым кромкам); 2) сварка давлением или сварка в пластическом состоянии (входят все способы, характеризующиеся применением давления).

Сварка материалов классифицируется:

1. Сварка плавлением (без давления)- дуговая, плазменная, газовая, электрошлаковая, лучевая, литейная.
2. Сварка давлением
 - а. Термомеханического класса-диффузионная, газопрессовая, индукционная, контактная, кузнечная, термитная.
 - б. Механического класса-трением, взрывом, холодная, ультразвуковая.

4.4 Типы сварных соединений

Сварные соединения, применяемые в производстве и ремонте, делятся на четыре основных типа: стыковые, внахлестку, угловые и тавровые (рисунок 4.1).

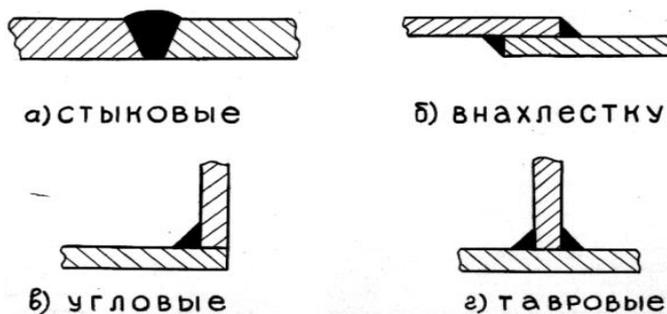


Рисунок 4.1 – Типы сварных соединений

Для получения высокопрочного сварного шва необходимо обеспечить равномерное сквозное проплавление свариваемых элементов. Это достигается специальной подготовкой кромок деталей перед сваркой. Особенности подготовки кромок определяются толщиной

свариваемого металла. Рассмотрим этот вопрос на примере стыкового соединения (ручная электродуговая сварка).

При сварке металла толщиной менее 3 мм производят отбортовку кромок на высоту h , равную удвоенной толщине металла (рисунок 4.2, а).

При толщине металла 3–8 мм кромки соединяемых листов не требуют специальной подготовки, необходимо лишь обеспечить взаимную параллельность их и зачистить участок металла 15–20 мм от кромки для удаления окалины, ржавчины и других загрязнений (рисунок 4.2, б). Зазор $\delta = 0–2$ мм делается для облегчения доступа расплавленного металла к нижним слоям и провара всего сечения. Его величина растет с увеличением толщины деталей.

При толщине металла 8–20 мм прибегают к односторонней разделке (скосу) кромок под углом $\alpha = 60–70^\circ$ (рисунок 4.2, в). Такая разделка кромок называется V-образной. Притупление кромок $c = 2–3$ мм делается для уменьшения опасности прожога металла вершины шва. Зазор принимается равным $\delta = 2–4$ мм.

При сварке материалов толщиной более 15–20 мм рекомендуется двухсторонняя (X-образная) разделка кромок (рисунок 4.2, г). Величина элементов кромок составляет: $\alpha = 60–90^\circ$; $c = 2–3$ мм; $\delta = 2–4$ мм.

При сварке изделий с резко различной толщиной более толстую деталь следует разделить, как показано на рисунке 4.2, д.

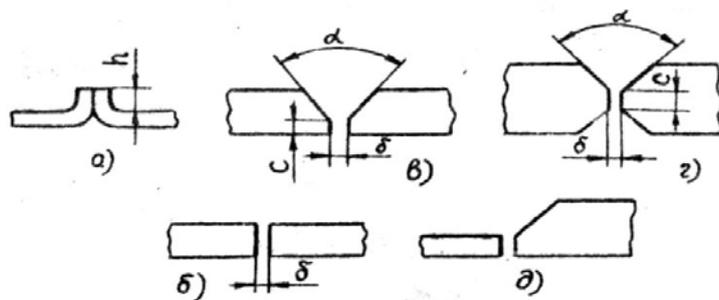


Рисунок 4.2 – Подготовка (разделка) кромок под стыковой шов

Сварные швы по расположению в пространстве делятся на нижние, горизонтальные, вертикальные и потолочные, а по технологии получения — непрерывные и прерывистые.

4.5 Ручная электродуговая сварка открытой дугой

Электродуговой (или просто дуговой) сваркой называется сварка плавлением, при которой нагрев металла осуществляется электрической дугой. По технологическим признакам эта сварка подразделяется на ряд способов: плавящимся и неплавящимся электродом, под слоем флюса, в среде защитного газа; по степени автоматизации — на ручную, полуавтоматическую и автоматическую.

Сущность ручной дуговой сварки плавящимся электродом заключается в следующем (рисунок 4.3).

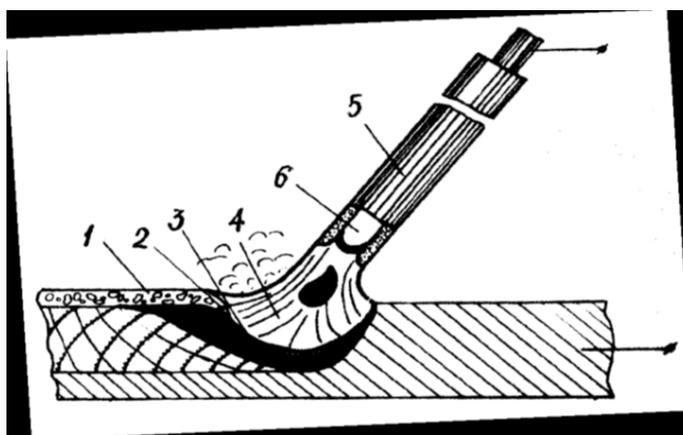


Рисунок 4.3 – Схема ручной дуговой сварки: 1 – затвердевший шлак; 2 – сварочная ванна; 3 – слой расплавленного шлака; 4 – столб дуги; 5 – обмазка на электроде; 6 – металлический стержень (электрод)

К электроду и свариваемому изделию подводится постоянный или переменный ток. Дуга расплавляет металлический стержень электрода и основной металл. Образуется общая сварочная ванна, состоящая из расплавленного металла, покрытая расплавленным шлаком. Сварочная дуга представляет собой стационарный электрический разряд в газовом промежутке между находящимися под напряжением электродами, одним из которых является свариваемая деталь, а другим – металлический стержень, покрытый специальной обмазкой. Этот разряд сопровождается большим выделением тепловой и световой энергии. Так в центре столба дуги температура может достигать $5000\text{--}7000^{\circ}\text{C}$ и выше; на катоде (отрицательном электроде) – 2400°C ; на аноде (положительном электроде) – 2600°C . Этого достаточно для сварки практически всех технических сплавов.

Для защиты металла шва от кислорода и азота воздуха в состав электродного покрытия вводят компоненты, образующие при расплавлении шлаки и газы, которые оттесняют воздух из зоны дугового разряда и сварочной ванны.

Кристаллизация металла сварочной ванны приводит к образованию сварного шва, соединяющего свариваемые детали (рисунок 4.4). В сварном соединении можно выделить три зоны: зону наплавленного металла I, зону термического влияния II и зону основного металла III (здесь структура и свойства металла в результате сварки не меняются).

Наплавленный металл имеет литую крупнозернистую структуру (дендриты). К литому шву прилегает зона термического влияния (околошовная зона), в которой можно выделить несколько участков: 1 – участок неполного расплавления; 2 – участок перегрева, имеющий крупнозернистое строение и пониженные механические свойства; 3 – участок нормализации с мелкозернистой структурой и повышенными механическими свойствами; 4 – участок неполной перекристаллизации; 5 – участок рекристаллизации (если металл предварительно был наклепан).

Околошовная зона оказывает существенное влияние на прочность сварного соединения, особенно при сварке высокоуглеродистых и легированных сталей, поскольку могут образовываться закалочные структуры, возникать большие внутренние напряжения. Это снижает пластичность и вязкость сварного соединения, может привести к образованию трещин. При ручной дуговой сварке протяженность зоны термического влияния 2–10 мм; при газовой 20–25 мм.

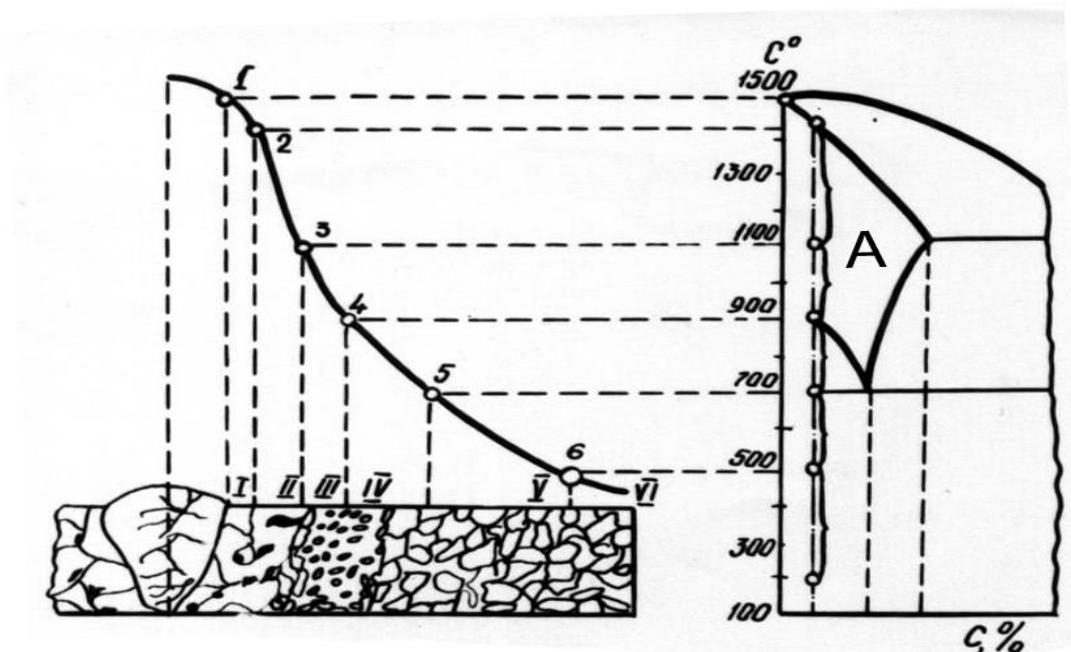


Рисунок 4.4 – Распределение температур по сечению сварного соединения и строение околошовной зоны при сварке сталей

При сварке сталей, подверженных закалке, необходим предварительный подогрев деталей, а для снятия остаточных напряжений – отжиг после сварки.

Как отмечалось, в процессе дуговой сварки происходит энергичное взаимодействие расплавленного металла с кислородом и азотом воздуха, что резко ухудшает свойства наплавленного металла. Существует два способа защиты расплавленного металла: 1) создание шлаковой защиты сварочной ванны; 2) создание защитной газовой атмосферы вокруг дуги и зоны сварки.

В соответствии с этим для получения высококачественных сварных соединений и повышения производительности на практике широкое распространение получили специальные виды дуговой сварки: сварка под слоем флюса и сварка в среде защитного газа.

4.6 Дуговая сварка под слоем флюса

Сваркой под флюсом называется дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сыпучего вещества, называемого флюсом. Этот способ был разработан советскими учеными под руководством Е.О. Патона и является высокопроизводительным, автоматизированным способом.

Сущность сварки заключается в том, что сварочная дуга (постоянного или переменного тока) зажигается между голой электродной проволокой 2 и изделием, находящимся под слоем флюса 4 (рисунок 4.5). Под действием пара и газов, создаваемых дугой, образуется полость 9 (газовый пузырь), в котором горит дуга. Давлением газов в пузыре и механическим давлением, создаваемым дугой, жидкий металл 8 оттесняется из-под дуги, что обеспечивает теплопередачу к основному металлу и глубокое его проплавление. Кристаллизация сварочной ванны приводит к образованию сварного шва. Затвердевший флюс образует шлаковую корку 6, которая, замедляя охлаждение металла, способствует выходу из него газов и неметаллических включений.

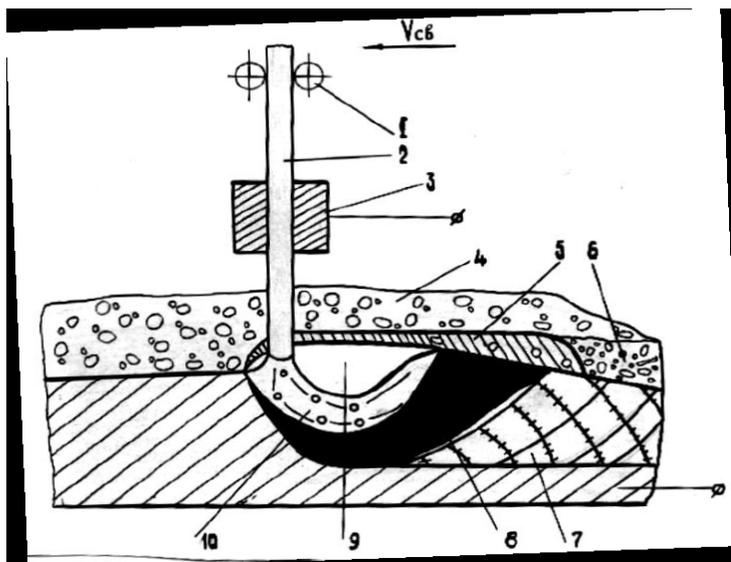


Рисунок 4.5 – Схема автоматической сварки под слоем флюса: 1 – подающие ролики; 2 – электродная проволока; 3 – токоподвод; 4 – флюс; 5 – слой расплавленного флюса; 6 – шлаковая корка; 7 – сварной шов; 8 – сварочная ванна; 9 – газовый пузырь; 10 – дуга

Флюс насыпают слоем толщиной 40–60 мм, не расплавившийся флюс собирают и используют вторично (~80%). Благодаря глубокому проплавлению можно сваривать детали без разделки кромок за один проход толщиной до 20 мм из стали и до 35 мм из алюминиевых сплавов. Формирование шва происходит в основном за счет металла деталей, что уменьшает расход электродной проволоки (2/3 объема шва формируется за счет основного металла и лишь 1/3 – за счет присадочного).

Особенностями сварки под флюсом (по сравнению с ручной сваркой) являются:

1. Очень высокое и равномерное качество сварки за счет того, что металл плавится и кристаллизуется под слоем флюса (нет контакта с воздухом, замедленное охлаждение).
2. Возможность резко (в 6–8 раз) увеличить силу сварочного тока. Если при открытой дуге сварка при силе тока 500–600 А невозможна (разбрызгивание металла, угар, нарушение формы шва), то погружение дуги во флюс позволяет применить ток силой в среднем 1000–2000 А, а максимально до 3000–4000 А.
3. Повышение производительности в 20–25 раз за счет увеличения силы тока, лучшего его использования, непрерывности процесса, механизации подачи проволоки.
4. Возможность уменьшить разделку кромок, а часто и вообще обойтись без нее.
5. Не требуется защита глаз сварщика.

К недостаткам сварки под флюсом можно отнести: а) невидимость места сварки, что затрудняет сварку швов сложной конфигурации; б) значительный расход флюса, что несколько удорожает производство; в) возможность сваривать только нижние швы, поскольку при отклонении шва от горизонтали более чем на 10–15° расплавленный металл и флюс стекают.

4.7 Дуговая сварка в среде защитного газа

Сваркой в защитном газе называется дуговая сварка, при которой; для защиты расплавленного металла в зону дуги подается защитный газ (инертный или активный).

Сущность процесса состоит в том, что электрическая дуга горит между неплавящимся (рисунок 4.6, а) или плавящимся (рисунок 4.6, б) электродами и изделием. Для защиты расплавленного металла в зону дуги непрерывно подается струя защитного газа. Защитный газ оттесняет воздух от зоны сварки, обеспечивая защиту расплавленного металла от вредного действия кислорода и азота воздуха.

Основные **преимущества** этого способа: 1) не нужно применять обмазки и флюсы, в связи с чем отпадает необходимость очищать шов от шлака; 2) возможность сварки в любых пространственных положениях (в отличие от сварки под флюсом); 3) малая зона термического влияния, вследствие высокой концентрации тепла; 4) простота наблюдения за процессом сварки; 5) возможность сваривать алюминиевые, титановые и другие сплавы, не поддающиеся сварке обычными способами.

Недостаток – трудность раскисления и легирования металла, так как нет шлака (только за счет металла электрода).

Защитные газы могут быть инертными и активными.

Инертные (благородные) газы имеют целиком заполненные наружные электронные оболочки, а потому не вступают в химические реакции (гелий, неон, аргон, криптон, ксенон). Наиболее доступным является аргон (в воздухе ~1% Ar по объему), он и служит основным защитным газом при сварке (из инертных).

Из **активных** газов применяют чаще всего углекислый газ, водород и азот. Эти газы значительно дешевле инертных и, в то же время, могут обеспечить хорошие результаты сварки. Например, азот по отношению к меди является абсолютно нейтральным и обеспечивает идеальную защиту.

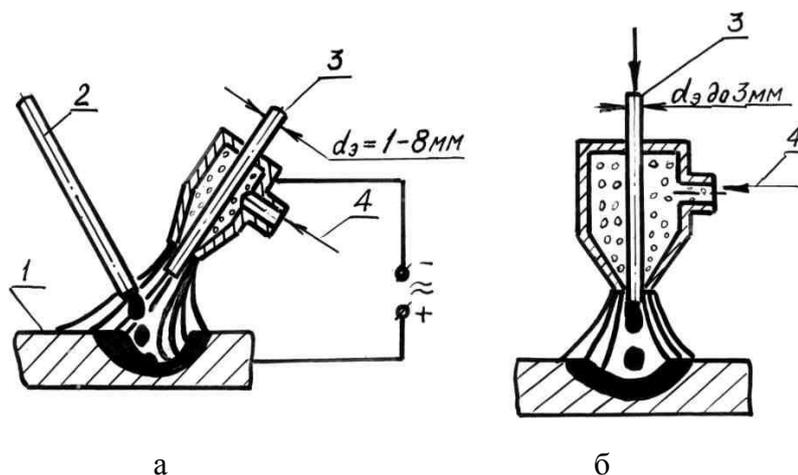


Рисунок 4.6 – Дуговая сварка в среде защитного газа: а – неплавящимся; б – плавящимся электродами; 1- изделие; 2- присадочный пруток; 3- электрод; 4- горелка.

Аргонодуговой сваркой называется сварка, при которой в качестве защитного газа используется аргон. Аргон – инертный газ, получаемый из воздуха при производстве кислорода и азота. Хранится и транспортируется в специальных стальных баллонах, окрашенных в серый цвет, под давлением 15 МПа.

Аргонодуговая сварка применяется для соединения ответственных деталей из специальных легированных сталей, цветных металлов и их сплавов: алюминиевых, магниевых, титановых и пр. Например, баки окислителей, емкости транспортных машин, домкраты пусковых установок, алюминиевая броня и др.

Сварка может выполняться вручную и на автоматах неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродами. Сила сварочного тока составляет 100–300 А.

Аргон, будучи тяжелее воздуха, хорошо защищает дугу и нагретый металл от окружающего воздуха, сжимает дугу, способствуя концентрации тепла.

Сварка в углекислом газе – дуговая сварка, при которой в зону дуги, в качестве защитного газа, подается углекислый газ (CO_2). Это наиболее экономичная сварка из всех известных способов сварки в защитных газах. Была разработана в начале 50-х годов прошлого

века, в ЦНИИТМАШ под руководством К.В. Любавского, и в настоящее время нашла широкое применение во всех странах мира.

4.8 Электро контактная сварка

Электро контактной сваркой называется сварка с применением давления, при которой нагрев производится теплом, выделяемым при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части. Согласно ГОСТ 19521-74 контактная сварка относится к термомеханическому классу, то есть сварка осуществляется с использованием тепловой энергии и давления.

Различают следующие виды контактной электросварки: стыковая, точечная и шовная (роликовая).

Сущность контактной сварки: соединение металлов происходит за счет пластической деформации соединяемых деталей. Для повышения пластичности и снижения сопротивления деформированию в месте контакта металл нагревается за счет тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока. После разогрева детали механически сдавливают. Принципиальная схема сварки показана на рисунке 4.7.

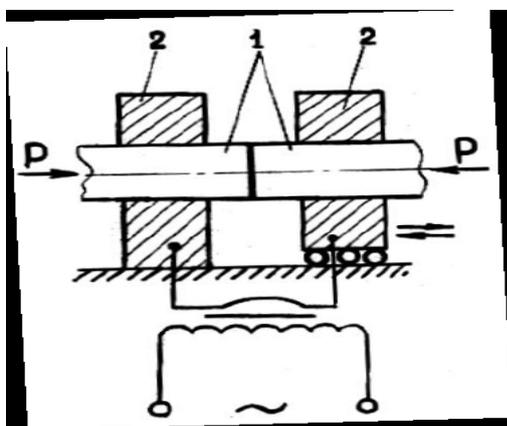


Рисунок 4.7 – Схема стыковой контактной сварки: 1 – свариваемые заготовки; 2 – зажимы (электроды) сварочной машины

Общее количество тепла, выделяемое электрическим током в проводнике, определяется по формуле Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \text{ Дж},$$

где I – сварочный ток, A ; R – полное сопротивление сварочного контура, Ом ; τ – время прохождения тока, s .

Наиболее сильно и быстро нагревается место контакта свариваемых деталей, так как электросопротивление здесь по величине значительно превосходит сопротивление любого другого участка сварочного контура. Повышенное электросопротивление контакта вызывается следующими причинами: 1) действительное сечение контакта резко уменьшено из-за наличия микронеровностей на поверхности стыка даже после тщательной обработки; 2) на поверхности свариваемых металлов имеются пленки оксидов и загрязнения с малой электропроводностью. Чем больше сварочный ток, тем меньше продолжительность нагрева, меньше потери тепла в окружающую среду, тем выше КПД процесса. Поэтому сварку ведут при высоких плотностях тока.

Рассмотрим особенности выполнения стыковой, точечной и шовной сварки.

Стыковая сварка – контактная сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит по всей поверхности соприкосновения свариваемых деталей. При этом способе сварки заготовки закрепляются в зажимах сварочной машины (см. рисунок 4.7). Один из зажимов является подвижным и связан с механизмом осадки. Оба зажима гибкими шинами

соединены со сварочным трансформатором, который питается от сети переменного тока. По способу и температуре нагрева стыковую сварку разделяют на сварку сопротивлением (без оплавления) и сварку оплавлением.

При сварке **сопротивлением** детали прижимают друг к другу и пропускают ток. Детали должны быть тщательно очищены, а торцы их должны быть строго параллельны. При сварке **оплавлением** ток включают, имея зазор между деталями. При этом происходит электрический разряд, и металл быстро разогревается до оплавления торцов; расплавленный металл вместе с оксидами выдавливается из зазора (при осадке), образуя так называемый **грат**, который удаляется механическим способом.

Сварка оплавлением имеет ряд существенных преимуществ: а) хорошо свариваются разнородные металлы и сплавы. Этим способом можно сварить практически любые металлы любого сечения; б) в процессе оплавления выравниваются все выступы и неровности, поэтому поверхность стыка не требует особой подготовки; в) все загрязнения и оксидные пленки полностью удаляются, что обеспечивает повышенное качество сварного соединения. Недостатком сварки оплавлением является то, что несколько увеличивается расход материала (вследствие оплавления). Это особенно ощущается при сварке дорогих и дефицитных материалов.

Точечная контактная сварка – сварка, при которой соединение происходит на участках, ограниченных площадью торцов электродов (условно в точках, причем одновременно могут свариваться до 50 точек). При точечной сварке заготовки соединяют внахлестку и зажимают с усилием P между медными электродами, подводящими ток к месту сварки (рисунок 4.8 а). После нагрева до пластического состояния или до частичного расплавления внутренних слоев металла ток выключают. В результате образуется литая сварная точка.

Шовная (роликовая) контактная сварка – сварка, при которой соединение выполняется внахлестку вращающимися дисковыми электродами в виде непрерывного или прерывистого шва. По технологии она мало отличается от точечной и применяется в производстве вооружения для получения таких же изделий (особенно, когда требуется герметичность). Схема сварки представлена на рисунке 4.8 б.

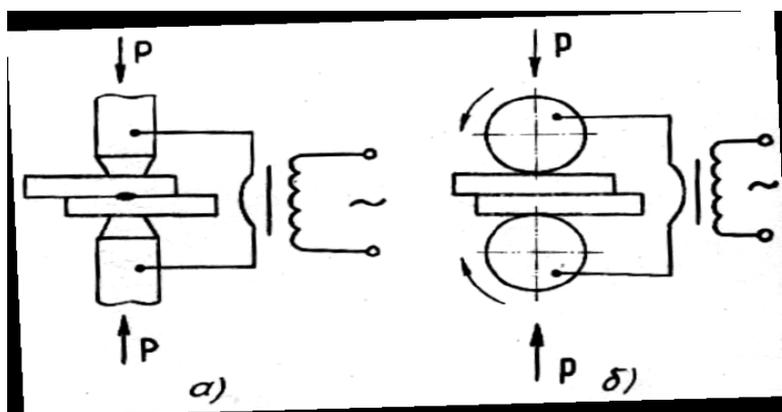


Рисунок 4.8 – Схемы точечной (а) и роликовой (б) сварки

Точечной и шовной сваркой чаще всего соединяют листовый материал толщиной от 0,5 до 5 мм.

4.9 Оборудование и технология электродуговой сварки

Специально оборудованное место для сварки называется **сварочным постом**. В состав сварочного поста входят: 1) источник питания сварочной дуги (сварочная установка); 2) принадлежности и инструмент сварщика (электрододержатель, щиток или маска, стальная щетка, молоток, зубило, ящик или сумка с электродами, токоподводящие провода); 3)

дополнительное оборудование (металлический стол, кабина или ширма, стул и т.п.); 4) средства индивидуальной защиты сварщика и пожаротушения.

Источники питания предназначены для питания током сварочной дуги. Они должны:

а) обеспечивать легкое зажигание и устойчивое горение дуги;

б) иметь напряжение U_{xx} на зажимах при разомкнутой сварочной цепи (напряжение холостого хода) не выше 60–90 В, а при установившемся режиме сварки в 2–2,5 раза ниже. Чем больше напряжение U_{xx} , тем легче зажигать дугу, но увеличивается опасность поражения током сварщика. Ток короткого замыкания не должен превышать рабочий ток более чем в 1,5 раза (во избежание перегорания проводов и аппаратуры);

в) обеспечивать возможность регулирования силы сварочного тока для сварки металла различной толщины.

Для ручной дуговой сварки используются как источники переменного (сварочные трансформаторы), так и постоянного тока (сварочные генераторы и выпрямители).

Сварочные трансформаторы применяются в стационарных ремонтных мастерских, где есть сеть промышленного напряжения 220 или 380 В. Они, как правило, имеют падающую внешнюю характеристику, их используют для дуговой ручной сварки и автоматической сварки под флюсом. Широко применяют трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием и подвижной вторичной обмоткой (типов ТС и ТД). В этих трансформаторах первичная 1 и вторичная 2 обмотки раздвинуты относительно друг друга, что обуславливает их повышенное индуктивное сопротивление вследствие появления потоков рассеяния.

Сварочные генераторы постоянного тока — электрические машины с приводом от электродвигателя (сварочные *преобразователи*) или от двигателя внутреннего сгорания (сварочные *агрегаты*). Сварочные агрегаты применяют в местах отсутствия электроэнергии (в полевых условиях). В состав комплекта войсковых ремонтных мастерских входит агрегат типа АДБ-309, имеющий генератор ГД-303, напряжение холостого хода 75–80 В, пределы регулирования сварочного тока 15–350 А, двигатель бензиновый "Волга" ГАЗ-320-01.

Сварочные генераторы имеют низкий КПД, равный 0,3–0,6.

Сварочные выпрямители изготавливаются с селеновыми и кремниевыми полупроводниковыми выпрямительными элементами. Они проще, дешевле, экономичнее сварочных генераторов и за последние годы получили широкое применение в сварочной технике. Для нормальной работы выпрямителей требуется интенсивное охлаждение, так как полупроводники нагреваются при работе, что иногда ограничивает мощность выпрямителей. Их КПД составляет 0,6–0,7.

4.10 Газовая сварка

Сущность процесса газовой сварки

Газовой сваркой называется сварка плавлением, при которой нагрев кромок соединяемых деталей происходит пламенем газов, сжигаемых на выходе горелки.

Сущность газовой сварки заключается в следующем (рисунок 4.9). В сварочную горелку I подаются кислород и горючий газ (обычно ацетилен), которые при выходе из горелки образуют горючую смесь, воспламеняемую при температуре 400–420⁰С. Сварочное пламя 2 расплавляет основной 3 и присадочный 4 металл с образованием сварочной ванны. При остывании ванны происходит совместная кристаллизация основного и присадочного металла, что приводит к образованию сварного шва.

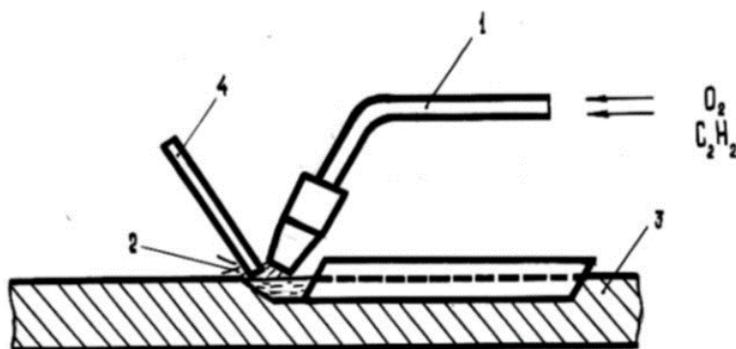


Рисунок 4.9 – Схема газовой сварки

Основное **достоинство** газовой сварки – универсальность с точки зрения, как сварки металлов различных толщин, так и свойств. Газовой сваркой можно сваривать малые толщины от 0,2 мм и выше, цветные металлы, металлы, требующие медленного нагрева и охлаждения, производить пайку, наплавочные работы, термообработку. К **недостаткам** газовой сварки относятся: трудность автоматизации процесса, длительное тепловое воздействие на свариваемый металл (зона термического влияния до 25–30 мм).

С учетом этого наиболее широко применяют газовую сварку при ремонте вооружения в полевых условиях. В состав ремонтных мастерских входит пост газовой (кислородно-ацетиленовой) сварки.

Применяемые газы и характеристика сварочного пламени

Для сварки многих металлов практически пригодна пламя с температурой не ниже 3000⁰ С. Только в этом случае будет обеспечена универсальность способа. Такую температуру (до 3200⁰ С), достаточную для сварки стали, дает ацетилен при сжигании в технически чистом кислороде. Ни один другой промышленный горючий газ не может дать температуру выше 2500–2700⁰ С (водород, природный газ, пары бензина и т.п.). Сжигание ацетилена (тем более других газов) в воздухе дает пламя со слишком низкой температурой (до 2000⁰С), что объясняется большим содержанием в воздухе инертных газов, снижающих пирометрический эффект.

Таким образом, для газовой сварки необходимы два газа: кислород и ацетилен.

Кислород получают из воздуха, хранят и используют в стальных баллонах емкостью 40 л, которые вмещают 6 м³ газа при давлении 15 МПа (150 атм.). Баллоны окрашены в голубой или синий цвет.

Ацетилен – непредельный углеводород С₂Н₂ получают в ацетиленовых генераторах из карбида кальция (сплав извести с углем при высокой температуре) путем разложения его в воде:



Реакция протекает с выделением тепла. Из 1 кг карбида кальция выделяется около 300 л ацетилена. Получение ацетилена в генераторах производится непосредственно на месте сварки. В ряде случаев это неудобно, но хранение ацетилена в баллонах связано с большими трудностями, так как чистый ацетилен в больших объемах при давлении более 2 атм. взрывоопасен. Хранить и транспортировать ацетилен можно растворенным в ацетоне, которым пропитана пористая масса, заполняющая баллон. В этом случае можно поднять давление до 15 атм. (1,5 МПа). Баллоны с ацетиленом окрашивают в белый цвет.

Сварочное газовое пламя служит: а) для расплавления металла; б) восстановления, науглероживания и окисления ванны (то есть для защиты).

Получение пламени того или иного характера достигается изменением соотношения горючего газа (ацетилена) и кислорода в смеси.

Нормальное пламя (соотношение объемов кислорода и ацетилена $O_2:C_2H_2 \sim 1$) является восстановительным и применяется наиболее часто (сварка углеродистых и легированных сталей, цветных металлов, пайка, наплавка, резка и др.).

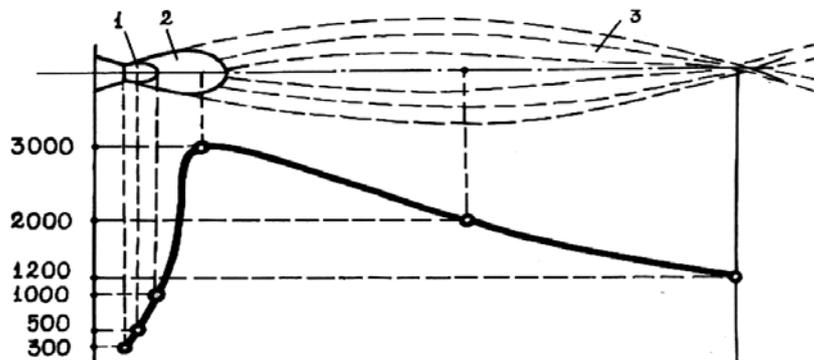


Рисунок 4.10 – Распределение температуры по зонам пламени:
1 – ядро пламени; 2 – рабочая зона; 3 – факел

Строение нормального ацетиленокислородного пламени показано на рисунке 4.10. Ядро пламени 1 имеет яркое свечение. Здесь происходит разогрев ацетилена с выделением частиц углерода. Температура относительно невысока ($300-1000^{\circ}C$). В рабочей зоне 2 наблюдается наивысшая температура до $3200^{\circ}C$. В ней ацетилен сгорает в кислороде по реакции: $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$.

Сварку производят второй (рабочей) зоной пламени.

4.11 Пайка материалов

Пайка наряду со сваркой является одним из важнейших технологических процессов соединения металлов во многих отраслях техники. Ее широкое применение объясняется целым рядом преимуществ перед сваркой. При пайке значительно меньше нагрев деталей, что не приводит к изменению структуры и механических свойств металла; более высокая точность из-за меньшего уровня остаточных напряжений; лучше внешний вид соединения; возможно соединение разнородных материалов.

Сущность и основные способы пайки

Пайка – процесс получения неразъемного соединения металлов в твердом состоянии с помощью расплавленного припоя. Сущность пайки заключается в следующем: расплавленный припой растекается по нагретым и очищенным поверхностям, смачивает их с частичным растворением и диффузией, а после затвердевания обеспечивает неразъемное соединение.

Для осуществления процесса пайки необходимо выполнение следующих условий: а) поверхности деталей должны быть чистыми от загрязнений и оксидных пленок; б) припой должен как можно лучше смачивать металл деталей; в) температура плавления припоя должна быть ниже температуры плавления основного металла; г) между деталями должен быть зазор определенной величины для затекания припоя.

Смачиванию основного металла жидким припоем и их взаимодействию препятствуют оксидные и жировые пленки. Эти пленки должны тщательно удаляться с поверхности деталей непосредственно перед пайкой механически (зачисткой) или химически (травлением). Однако в процессе пайки на поверхности металла при контакте с воздухом вновь образуются оксиды,

нитриды, сульфиды и др. Для предотвращения этого применяют флюсы, защитную атмосферу или вакуум.

Заполнение зазора припоем происходит под влиянием силы тяжести и капиллярных сил. При назначении зазора следует учитывать, что сила тяжести проявляет себя только при соответствующем пространственном положении зазора. Капиллярные силы могут действовать независимо от пространственного положения зазора, но при определенной его величине. Как при очень малом, так и при излишне большом зазоре капиллярные силы могут отсутствовать, а сила тяжести оказаться недостаточной или направленной не в ту сторону. В результате, паяный шов может оказаться не сплошным. Экспериментально установлено, что наибольшая прочность паяных соединений деталей, изготовленных из различных материалов и паяных различными припоями, достигается при зазорах от 0,02 до 0,2 мм.

С помощью пайки можно соединять: углеродистые и легированные стали всех марок, в том числе инструментальные и нержавеющие, твердые сплавы и ковкие чугуны, все цветные металлы и их сплавы, благородные и редкие металлы и т.д., причем возможно прочное соединение разнородных металлов, а в ряде случаев – металлов с неметаллами (стеклом, керамикой и т.п.).

В соответствии с ГОСТ 17349-71 все существующие способы пайки можно классифицировать по следующим признакам:

1. По температуре нагрева материала и припоя в месте контакта:

- *низкотемпературная* или пайка мягкими припоями, при которой нагрев не превышает 450°C (723°K);

- *высокотемпературная* или пайка твердыми припоями, при которой нагрев в месте контакта выше 450°C (723°K).

2. По источнику нагрева: пайка паяльником, газопламенная, электрическая, в расплаве солей или припоя, печная и некоторые другие.

Весьма важным, как и при сварке, является выбор типа соединения. **Типы паяных соединений** показаны на рисунке 4.11. Нахлесточное соединение обеспечивает наибольшую прочность, сопоставимую с прочностью основного металла. Стыковое соединение имеет лучший внешний вид и применяется, когда удвоение толщины металла нежелательно. Соединение в скос (“ус”) совмещает преимущества первых двух способов, но требует усложненной подготовки кромок.

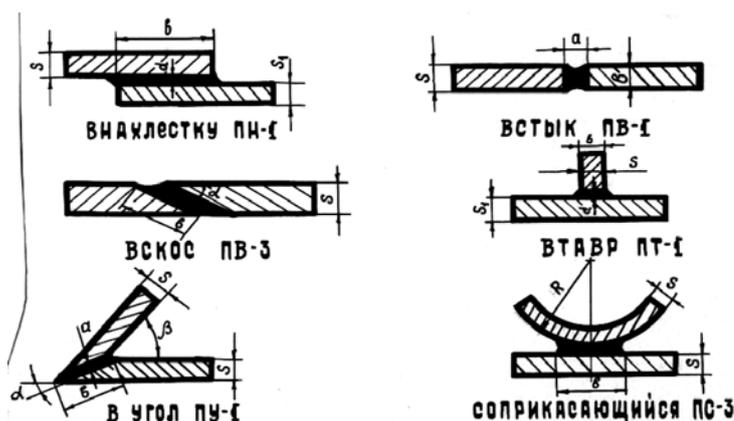


Рисунок 4.11 – Типы паяных соединений

Материалы и технология пайки

К основным материалам, применяемым для пайки, относятся флюсы и припой.

Флюсы во время пайки выполняют следующие задачи: а) защищают поверхность металла и припоя от окисления; б) растворяют и удаляют окислы и загрязнения с поверхности металла; в) улучшают смачиваемость и растекание припоя.

Для пайки применяют флюсы трех типов:

- кислотные или активные;
- активированные;
- бескислотные (неактивные).

Активные флюсы (хлористый цинк $ZnCl_2$ и его растворы, бура $Na_2 B_4 O_7$, их смеси и т.п.) применяются преимущественно для пайки твердыми припоями. Они интенсивно растворяют оксидные пленки, обеспечивая высокую прочность соединения. Остаток флюса вызывает интенсивную коррозию металла, поэтому после пайки детали нужно тщательно промывать. Например, для пайки проводников при монтаже электрорадиоаппаратуры применять активные флюсы категорически запрещено.

Бескислотные (неактивные) флюсы (канифоль, ее растворы, глицерин, воск, стеарин, вазелин и их смеси) хорошо очищают медь, латунь и другие цветные сплавы и применяются преимущественно для пайки мягкими припоями. Остатки этих флюсов негигроскопичны, не электропроводны и не вызывают коррозии, что особенно ценно при монтаже электрорадиоаппаратуры.

Активированные — это флюсы на основе канифоли с добавкой активаторов (салициловая кислота, солянокислый анилин и др.) для улучшения растворения оксидов. Обладают слабо корродирующими свойствами.

Припой делятся на высокотемпературные (твердые) и низкотемпературные (мягкие).

Высокотемпературные (твердые) припои обладают значительной механической прочностью (σ_b до 500 МПа) и применяются для соединения нагруженных деталей машин, частей режущего инструмента и т.п. В качестве твердых припоев применяются медные, медноцинковые и серебряные. Отдельную группу составляют алюминиевые припои. Наиболее важные припои стандартизированы. В таблице 5.2 приведен состав и примерное назначение некоторых припоев по ГОСТ 8180-70.

Низкотемпературные (мягкие) припои имеют малую механическую прочность ($\sigma_b = 30-100$ МПа), поэтому применяются главным образом для уплотнения шва, придания ему герметичности и хорошего контакта между деталями (например, электрического). Если соединение подвергается воздействию значительных нагрузок, рекомендуется до пайки скреплять детали заклепками, шпильками, резьбой, точечной сваркой и т.п.

Технологический процесс пайки складывается из следующих основных операций: выбора способа пайки, припоя, флюса и типа паяного соединения; назначения режима пайки; подготовки поверхностей соединяемых изделий и собственно пайки. Процесс соединения деталей с помощью твердого припоя состоит из следующего.

1. Обезжиривание поверхностей в горячей щелочи, керосине, бензине, ацетоне, спирте и т.п.
2. Механическая очистка оксидных пленок наждачной бумагой, шлиф-кругами, щетками и т.д.
3. Сборка деталей с нанесением припоя и флюса (между кромками или около места пайки).
4. Скрепление собранных деталей проволочными связками, шпильками, точечной сваркой и др.
5. Покрытие поверхностей, которые не должны облуживаться, пастой из мела, глины, графита и т.п.
6. Нагрев деталей до температуры на 50–100⁰С выше температуры плавления припоя (точки ликвидус).
7. Охлаждение, промывка и очистка деталей от остатков флюса и припоя.

Тема 5. ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

5.1 Основы процесса резания металлов

Обработка резанием является и на многие годы останется основным способом изготовления точных деталей поскольку позволяет получить готовые детали с исключительно высокой точностью и низкой шероховатостью поверхности, недостижимыми никакими другими методами обработки.

В настоящее время доля обработки резанием составляет около 40% и, следовательно, оказывает решающее влияние на темпы развития машиностроения.

Сущность процесса стружкообразования

Обработкой резанием называется обработка, заключающаяся в образовании новых поверхностей отделением поверхностного слоя материала. Слой материала, срезаемый с заготовки режущим инструментом, называется **стружкой**.

Процесс резания (стружкообразования) — сложный процесс, сопровождающийся различными физико-химическими явлениями, такими как:

- упругое и пластическое деформирование срезаемого металла и обработанной поверхности (сжатие, растяжение, сдвиг);
- большое тепловыделение. В зоне контакта "режущий инструмент–заготовка" температура достигает $800\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ при обработке лезвийным инструментом и до 1500°C — при обработке абразивным инструментом. Имеет место сложная схема теплопередачи;
- значительное трение при очень больших давлениях и высокой температуре;
- наростообразование на передней поверхности инструмента (при определенных условиях);
- износ режущего инструмента в процессе обработки, что существенно усложняет картину деформирования и разрушения материала (истирание, адгезия, диффузия);
- вибрации (колебания) системы СПИД (станок–приспособление–инструмент–деталь).

Схему образования элементной стружки при свободном резании можно проследить на рисунке 5.1.

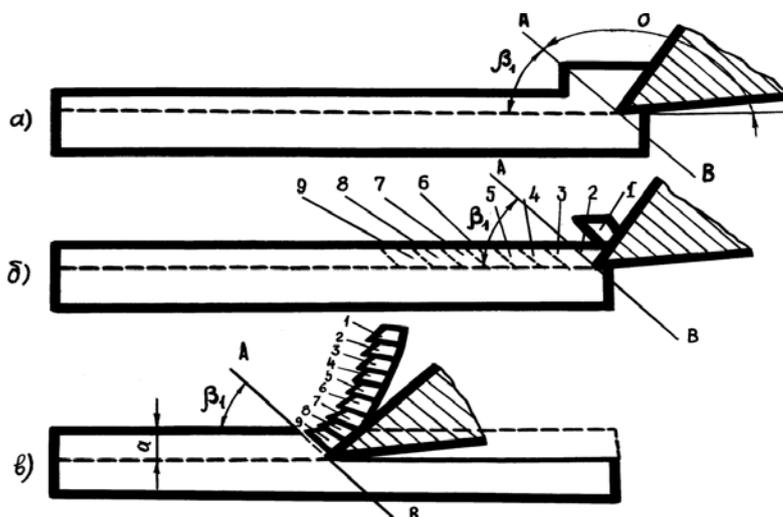


Рисунок 5.1 – Схема образования стружки

а) По мере внедрения резца в металл (под действием силы резания P_z) растут напряжения в срезаемом слое, и когда они достигнут предела прочности материала, произойдет сдвиг (скалывание) по плоскости сдвига AB (это плоскость максимальных касательных напряжений).

б) После скалывания первого элемента стружки резец деформирует следующий близлежащий слой металла, в результате чего образуется второй элемент, отделяющийся под тем же углом β_1 .

в) В результате образуется стружка, состоящая из отдельных элементов.

Угол β_1 называется углом сдвига (скалывания). Установлено, что в зависимости от угла резания угол сдвига $\beta_1=35-45^\circ$ (чем больше угол резания, тем меньше β_1).

В зависимости от условий обработки (свойств материала, геометрии резца, режимов резания) стружка может быть различных видов: элементная, ступенчатая и сливная (рисунок 5.2).

Элементная стружка состоит из отдельных элементов, слабо связанных или вовсе не связанных между собой. Образуется при обработке твердых и маловязких металлов с малой скоростью резания. Процесс сопровождается колебаниями сил резания, что приводит к вибрации и ухудшает качество поверхности.

Ступенчатая стружка состоит из отдельных элементов, прочно связанных между собой. При резовой стороне такой стружки гладкая, а противоположная имеет зазубрины. Образуется при резании сталей со средними скоростями резания. Процесс протекает более спокойно, качество обработки выше, чем в первом случае.

Сливная стружка сходит с резца в виде ленты, без зазубрин. Получается при резании пластичных, вязких материалов (многие марки сталей) с высокими скоростями резания. При этом на систему СПИД действует равномерная нагрузка, получается хорошее качество поверхности и затрачивается наименьшее количество энергии на процессе резания.

Отметим, что, создавая различные условия резания, можно при обработке одного и того же материала получить различные виды стружек, то есть влиять на ход процесса. Получение сливной стружки вместо элементной и ступенчатой во многом подтверждает правильность назначенных геометрических элементов резца и режимов резания.

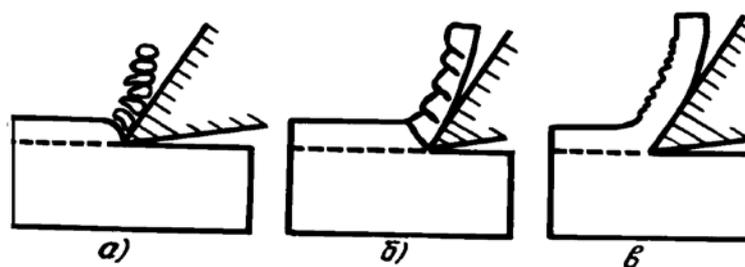


Рисунок 5.2 – Типы стружек:

а) – элементная, б) – ступенчатая, в) – сливная

Классификация способов обработки резанием

Процесс резания возможен при совмещении двух основных движений: главного движения резания и движения подачи. По величине скорость резания обычно во много раз больше скорости подачи. Обработка резанием осуществляется на металлорежущих станках (при слесарной обработке и вручную) с применением режущих инструментов и приспособлений.

Различают следующие основные виды обработки резанием (рисунок 5.3).

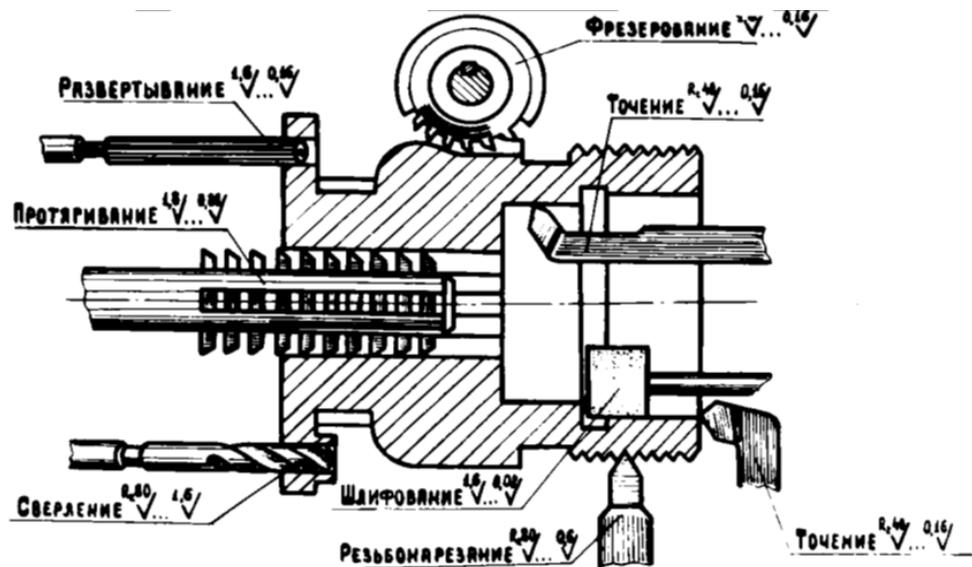


Рисунок 5.3 – Основные способы обработки резанием

Точение. Главное движение — вращение заготовки, движение подачи — поступательное перемещение резца. Оба движения осуществляются одновременно и непрерывно. Применяется для обработки тел вращения.

Строгание. Главное движение — прямолинейное движение резца, подача — перемещение заготовки в направлении, перпендикулярном перемещению резца. Подача осуществляется периодически во время холостого хода инструмента. С помощью строгания получают плоские и несложные фасонные поверхности с прямолинейными образующими.

Сверление (зенкерование, развертывание). Инструмент, как правило, получает и главное (вращательное), и движение подачи (поступательное вдоль оси), а заготовка остается неподвижной. Применяется для обработки отверстий.

Фрезерование производится при вращении многозубого инструмента (фрезы) и поступательном перемещении (подаче) заготовки. Применяется для получения плоскостей, пазов, уступов, фасонных поверхностей, резьб, зубьев, шлицев.

Протягивание осуществляется при прямолинейном (реже вращательном) движении многозубого режущего инструмента относительно заготовки. Подача обеспечивается конструкцией протяжки, так как каждый последующий зуб выше предыдущего на толщину срезаемого слоя. Применяется для изготовления отверстий различной формы (круглых, шестигранных, квадратных, шлицевых, с винтовыми канавками, нарезам, шпоночными пазам), а также для обработки наружных поверхностей (реже).

Шлифование — процесс обработки металлов резанием с помощью абразивного инструмента (шлифовальных кругов, брусков, лент, паст, порошков). Применяется для получения деталей высокой точности и качества поверхности, а также деталей из твердых, высокопрочных материалов (например, закаленных сталей), для заточки разнообразного режущего инструмента. Схемы шлифования чрезвычайно разнообразны. Так, при круглом шлифовании, (см. рисунок 5.3) шлифовальный круг вращается быстро (со скоростью резания) и получает поступательные движения подачи (продольное — вдоль оси заготовки и поперечное — на врезание). Заготовка вращается медленно (круговая подача).

При любом способе резания различают черновую (предварительную), получистовую (промежуточную), чистовую (окончательную), финишную (отделочную) обработку.

При предварительных операциях не предъявляют высоких требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей, при этом оставляют припуск для дальнейшей обработки. Обработку ведут на максимально допустимых режимах резания, исходя из условия наивысшей производительности. Например, заготовку сначала обтачивают или фрезеруют, а затем оставленный небольшой припуск (десятые или сотые доли миллиметра) удаляют шлифованием, получая высокую точность и чистоту поверхности.

При особо высоких требованиях к точности и качеству поверхности после чистовой обработки применяют отделочные (финишные) операции. К ним относятся: алмазное точение, тонкое шлифование, полирование, хонингование, притирка, доводка, суперфиниширование.

Параметры режима резания

Основными элементами (параметрами) резания являются: **глубина резания, подача, скорость резания**. Совокупность этих трех параметров называют режимом резания. Для изучения физической стороны процесса дополнительно вводят еще два параметра: **ширину и толщину срезаемого слоя**.

Принципиальная кинематическая схема продольного точения показана на рисунке 5.4, а. Главное движение — вращательное — совершает заготовка, а движение подачи — поступательное — резец.

Введем следующие обозначения поверхностей: 1 — обрабатываемая поверхность (поверхность заготовки до обработки), 2 — поверхность резания (переменная поверхность конической формы), 3 — обработанная поверхность (поверхность после обработки).

Глубина резания t — величина слоя, срезаемого за один ход резца, измеренная по нормали к обработанной поверхности.

Глубина резания всегда перпендикулярна направлению движения подачи и определяется при точении с продольной подачей как $t=(D - d)/2$, мм, при прорезке канавок и отрезке она равна ширине прорези, при сверлении — половине диаметра сверла и т.п.

Подача (скорость подачи) S — величина перемещения режущей кромки относительно обработанной поверхности в единицу времени (или величину ей эквивалентную). При точении и сверлении подача определяется за один оборот заготовки и имеет размерность мм/об; при фрезеровании, шлифовании — за единицу времени (мм/мин), при протягивании — на один зуб режущего инструмента (мм/зуб).

Кроме того, по характеру движения различают продольную, поперечную, наклонную, вертикальную, круговую, а также непрерывную и прерывистую подачи.

Скорость резания V — величина перемещения каждой точки режущей кромки относительно поверхности резания в единицу времени.

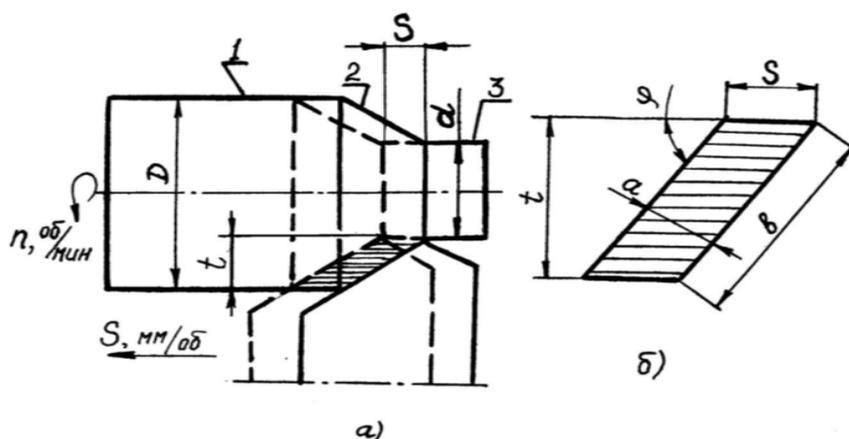


Рисунок 5.4 – Элементы режима резания: а) – схема продольного точения; б) – сечение среза

Строго говоря, скорость резания есть сумма векторов двух скоростей движения (главного и подачи), но поскольку скорость подачи существенно меньше скорости главного движения, то на практике ее влияние не учитывается. Кроме того, скорость резания является величиной переменной по длине режущей кромки. Однако в практических расчетах принимается ее максимальное значение, определяемое по формуле

$$V =$$

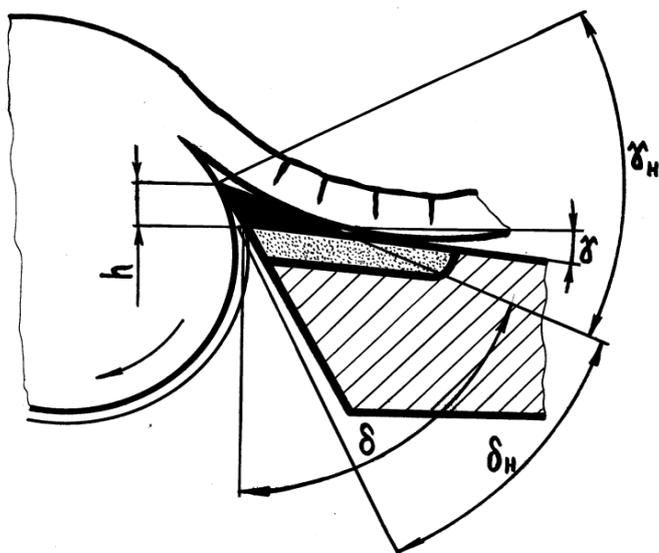


Рисунок 5.5 – Нарост на режущем инструменте

Для образования нароста необходимы определенные температуры и давления. При низких скоростях резания (до 5–7 м/мин) нарост не образуется (мала температура); при повышении скорости происходит образование нароста, а при больших скоростях (выше 70–90 м/мин) нарост исчезает, так как при повышении температуры он размягчается (отпускается) и уносится стружкой.

Положительное значение нароста: снижает износ резца, выполняя резание; увеличивает передний угол, что облегчает процесс резания; улучшает теплоотвод от режущего лезвия.

Отрицательное значение нароста: ухудшает качество обработанной поверхности; изменяет геометрию резца, что приводит к снижению точности размеров детали; постоянное изменение переднего угла вызывает колебание сил резания, вибрацию системы СПИД.

Очевидно, что нарост полезен при грубой черновой и недопустим при чистовой окончательной обработке.

Меры для уменьшения наростообразования: применение смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ); полировка передней грани резца; работа на высоких скоростях; наложение колебаний (вибраций).

Деформирование срезаемого слоя

Мерой деформации снимаемого слоя является завивание, усадка и наклеп стружки.

Завивание стружки обуславливается тем что, встречаясь с резцом, она вынуждена резко изменить направление движения. Этому способствует также неравномерное охлаждение стружки по толщине — стружка сильнее охлаждается (а, следовательно, и сжимается) в наружных слоях.

При работе со сливной стружкой желательно, чтобы она завивалась в виде винтовой спирали. Малоизвитая лентообразная стружка опасна для рабочего, так как она наматывается на заготовку, обвивает резец, суппорт, мешает следить за процессом, неудобна для транспортирования.

Завиванию стружки способствует уменьшение толщины среза и скорости резания.

В ряде случаев приходится применять специальные приемы для завивания и ломания стружки: с помощью лунок на передней поверхности резца, стружкозавивательных порошков, путем установки специальных стружколомателей и стружкозавивателей на резец.

Степень завивания и усадки стружки обязательно учитывают при конструировании канавок многолезвийного инструмента (протяжки, фрезы, сверла, развертки) в которых должна разместиться стружка.

Деформация обработанной поверхности

Обработанная поверхность, независимо от метода обработки, всегда представляет собой сочетание выступов и впадин (микронеровности). Их можно рассматривать как след движения режущих кромок инструмента, в результате чего на обработанной поверхности образуются гребешки и впадины.

Исследованиями установлено, что образование микронеровностей не является процессом чисто геометрическим, а существенно зависит от явлений процесса резания. Важнейшим фактором, влияющим на образование микронеровностей, является пластическая деформация материала среза и обработанной поверхности.

Чем пластичнее металл и крупнее его структура, тем выше шероховатость обработанной поверхности. На ней образуются надрывы, отдельные волокна срываются с ее поверхности. Сталь с мелкозернистой структурой обрабатывается чище, поэтому рекомендуется перед чистой обработкой подвергать ее нормализации или отжигу.

Из элементов режима резания преобладающее влияние на шероховатость оказывает *подача*. С увеличением подачи (в меньшей степени глубины резания) возрастает площадь сечения среза, температура, величина нароста, что приводит к увеличению шероховатости. Влияние *скорости резания* на шероховатость определяется, в основном, величиной нароста. При обработке хрупких материалов (чугун, бронза) нарост не образуется и, с увеличением скорости, шероховатость постепенно снижается (меньше деформации и вибрации). При обработке сталей с малыми (до 5 м/мин) и высокими скоростями (свыше 70 м/мин) обработанная поверхность чище (нарост отсутствует, вибрации минимальны). В зоне средних скоростей сталь больше деформируется, нарост максимальный, вибрации интенсивные и, как следствие, шероховатость выше.

Из *геометрических параметров* резца наибольшее влияние на шероховатость оказывают радиус при вершине r и углы в плане φ и φ_1 , чем больше r и меньше φ и φ_1 , тем ниже шероховатость (уменьшается высота остаточного сечения среза). По мере *износа* резца шероховатость увеличивается, так как поверхности резца становятся шероховатыми, кромки разрушаются (выкрашиваются), что увеличивает работу трения, нарост, вызывает появление вибраций. Поэтому необходимо тщательно затачивать резец и доводить (полировать) его поверхности.

Смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ) улучшает качество поверхности, так как уменьшает трение, затрудняет образование нароста и замедляет износ резца.

В результате пластического деформирования происходит упрочнение стружки и металла впереди резца в поверхностном слое. Упрочненный слой (глубиной от сотых долей до нескольких миллиметров) имеет повышенное значение твердости, предела текучести и предела прочности.

Влияние радиуса закругления вершины резца показано на рисунке 5.6.

Увеличение микротвердости поверхностного слоя (при хорошей чистоте) улучшает эксплуатационные свойства деталей (повышается износостойкость и усталостная прочность). Поэтому часто специально упрочняют поверхностный слой с помощью таких отделочных операций, как обкатка шариками и роликами, алмазное выглаживание, дробеструйная обработка и др.

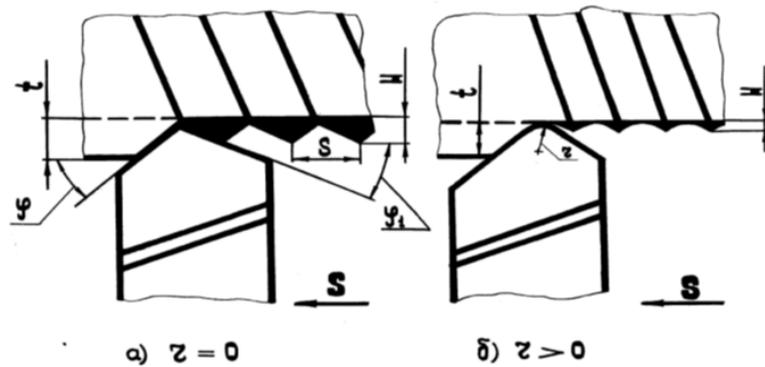


Рисунок 5.6 – Профиль поверхности при точении

Вибрации (колебания) при резании. Для того, чтобы получить высокую точность и чистую поверхность, не снижая стойкости режущего инструмента, нельзя допускать возникновения колебаний системы СПИД, то есть процесс резания должен быть виброустойчивым. При резании металлов наблюдаются два вида колебаний: вынужденные и самовозбуждающиеся (автоколебания).

Вынужденные колебания возникают из-за периодически действующей возмущающей силы и могут появиться: а) при прерывистом характере процесса резания; б) при дисбалансе вращающихся частей станка, детали или инструмента; в) при наличии дефектов в передачах станка; г) когда внешнее воздействие на систему происходит не непосредственно, а через изменение параметров системы; д) при передаче станку колебаний от других станков или машин, работающих поблизости. Для уничтожения этих колебаний необходимо устранить причины, вызывающие указанные вредные воздействия.

Автоколебания. К ним относятся такие вибрации, у которых переменная сила, их поддерживающая, создается и управляется самими колебаниями. Причинами автоколебаний могут служить: периодический срыв наростов, периодическое изменение нормальных сил и сил трения на контактных поверхностях при образовании стружек скалывания, неравномерность сечения стружки при изменении радиальной составляющей силы резания и другие причины.

Для борьбы с автоколебаниями применяют следующие способы: основной – повышение жесткости системы СПИД; правильный выбор геометрии режущих инструментов (углов в плане и переднего угла), применение виброгасящих фасок на передней поверхности резца; применение различных виброгасящих и демпфирующих устройств.

5.3 Силы и тепловыделение в процессе резания

Силы резания

Для того, чтобы происходило резание, к резцу должна быть приложена некоторая сила для преодоления сопротивления металла образованию стружки, что, в свою очередь, вызывает действие сил на резец со стороны обрабатываемой заготовки.

Все силы можно привести к суммарной равнодействующей силе R , расположенной в пространстве и приложенной к резцу. Однако равнодействующая в практических расчетах не применяется. Для удобства измерения и изучения силу раскладывают на три составляющие: P_z , P_y и P_x (рисунок 5.7).

Сила резания P_z (тангенциальная сила) — касательная к поверхности резания и совпадающая с вектором скорости резания.

Радиальная сила P_y направлена горизонтально и перпендикулярно оси заготовки.

Осевая сила P_x (сила подачи) действует параллельно оси заготовки в направлении, противоположном движению подачи.

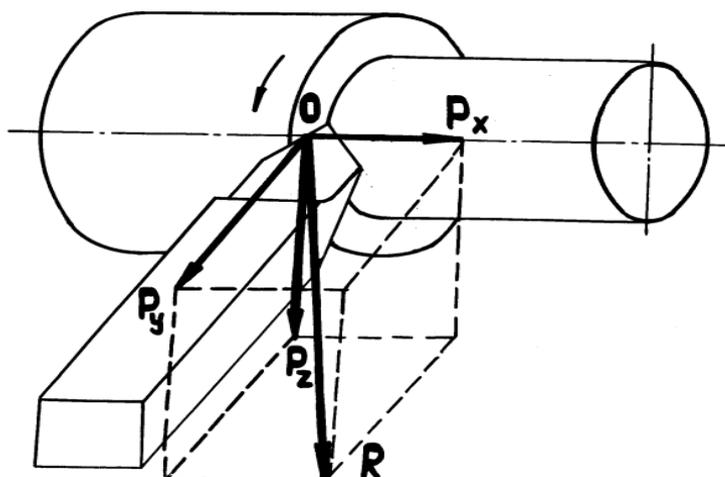


Рисунок 5.7 – Схема действия сил на резец

На величину сил резания оказывают влияние физико-механические свойства обрабатываемого материала, СОЖ, износ резца, его геометрия, элементы режима резания и другие факторы. В связи с этим теоретическое определение сил резания не представляется возможным. При исследованиях составляющие сил резания измеряются с помощью специальных приборов — динамометров (гидравлических, механических, электрических и других).

На практике для подсчета сил резания используются следующие эмпирические зависимости:

$$P_Z = C_{Pz} t^{Xz} S^{Yz} V^n K_z, (H)$$

$$P_Y = C_{Py} t^{Xy} S^{Yy} V^n K_y, (H)$$

$$P_X = C_{Px} t^{Xx} S^{Yx} V^n K_x (H)$$

Здесь C_{Pz}, C_{Py}, C_{Px} — коэффициенты, характеризующие данный материал и условия его обработки;

$Xz, Yz, Xy, Yy, Xx, Yx, n$ — показатели степеней при глубине резания, подаче и скорости резания;

Kz, Ky, Kx — общие поправочные коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки.

Значения этих коэффициентов для различных материалов и условий обработки даются в справочной литературе (справочники технолога, справочник металлста, общемашиностроительные нормативы по режимам резания).

Наибольшее влияние на силы оказывает глубина резания ($X \approx 1$), несколько меньшее — подача ($Y \approx 0.75$). Влияние скорости резания не монотонно: при малых скоростях $n=0$, в практически применяемом диапазоне скоростей $n = -0,15$ (то есть с увеличением скорости силы уменьшаются, так как меньше деформация).

Воздействие сил резания Pz, Py, Px на систему СПИД следующее:

Сила Pz :

а) Действует на механизм главного движения. По ней проверяется достаточность мощности станка

$$N_{рез} = Pz \cdot V \leq N_{ст} \eta.$$

б) Изгибает державку резца. По ней производится проверка прочности державки.

Сила $[P_z]$, допускаемая по прочности державки резца прямоугольного сечения определяется по формуле:

$$P_z \leq [P_z] =$$

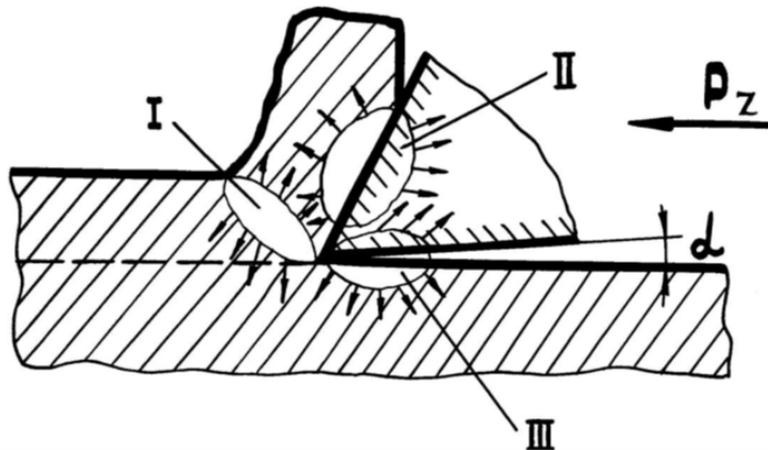


Рисунок 5.8 – Схема теплообразования при резании:
 I – зона наибольших пластических деформаций, II – зона трения стружки о переднюю поверхность резца, III – зона трения обрабатываемой заготовки о заднюю поверхность резца

Полное уравнение температуры резания в зависимости от условий обработки имеет вид

$$T = C \cdot V^z \cdot S^x \cdot t^y, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где C – общий коэффициент, характеризующий условия обработки (обрабатываемый материал, геометрию резца, СОЖ);

z , x и y – показатели степеней, характеризующие влияние скорости резания, подачи и глубины резания соответственно.

Наибольшее влияние на температуру в зоне резания оказывает скорость резания, меньшее – подача, еще меньше – глубина резания, то есть $z > x > y$. Значения коэффициентов приводятся в справочной литературе.

Для повышения стойкости инструмента необходимо снизить общую тепловую напряженность процесса и обеспечить интенсивный отвод тепла из зоны резания. Это осуществляется применением смазывающе-охлаждающих жидкостей. СОЖ должны обладать хорошими охлаждающими и смазывающими (для снижения трения) свойствами; не должны вызывать коррозии детали и станка, содержать токсичные компоненты. Наиболее широкое применение нашли следующие СОЖ: водные растворы минеральных электролитов, эмульсии, растворы мыл; минеральные, животные и растительные масла с добавками хлора, фосфора и серы (сульфофрезолы); керосин; масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ (графит, воск, парафин и др.).

Практически все современные металлорежущие станки оснащены системами подачи СОЖ.

5.4 Типы и геометрия резцов

Части и элементы токарного резца

Резец - режущий инструмент с одной главной режущей кромкой для обработки при двух совместных относительных движениях заготовки и самого инструмента. Резец является самым распространенным инструментом при обработке на токарных, строгальных, долбежных, расточных, револьверных, карусельных, станках-автоматах и полуавтоматах и других станках специального назначения.

Резец состоит из двух частей: рабочей части (головки) и крепежной части (стержня, тела или державки).

Рабочая часть образуется специальной заточкой и обеспечивает процесс резания.

Крепежная часть служит для закрепления резца в резцедержателе станка.

Головка резца имеет следующие элементы (рисунок 5.9, а):

а) переднюю поверхность 1, по которой сходит стружка;

б) задние поверхности – главную заднюю 2, обращенную к поверхности резания и вспомогательную заднюю 3, обращенную к обработанной поверхности;

в) режущие кромки, образованные пересечением передней и задних поверхностей; их две – главная 4, выполняющая работу резания, и вспомогательная 5;

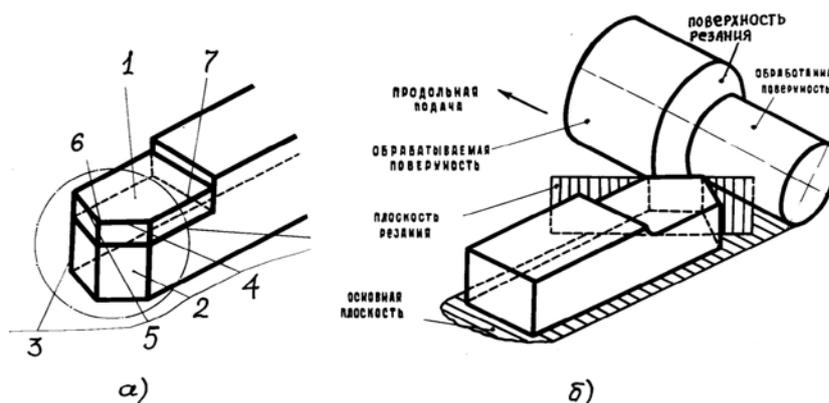


Рисунок 5.9 - Элементы головки токарного проходного резца (а) и поверхности (б) при точении

г) вершину резца 6 – место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок. Может быть острой, скругленной или в виде отрезка прямой линии (у чистовых резцов);

д) стружкозавивательный порожек 7. Для излома стружки могут также применяться специальные канавки на передней поверхности, накладные стружколомы или стружкозавиватели.

Основные углы резца

Для определения углов резца устанавливаются следующие исходные плоскости: плоскость резания и основная плоскость (рисунок 5.9, б).

Плоскость резания – плоскость, касательная к поверхности резания и проходящая через главную режущую кромку; *основная плоскость* – плоскость параллельная направлениям продольной и поперечной подачи (совпадает с опорной плоскостью призматического резца).

Главные углы резца измеряются в *главной секущей плоскости* (плоскость, перпендикулярная к проекции главной режущей кромки на основную плоскость). К главным углам резца относятся задний угол, передний угол, угол резания и угол заострения (рисунок 5.10).

Главный задний угол α — угол между главной задней поверхностью и плоскостью резания (при плоской задней поверхности). Этот угол должен быть только положительным, иначе будет иметь место трение задней поверхности о заготовку. Оптимальные значения $\alpha = 6-12^\circ$ (меньшие для твердых и хрупких, большие – для мягких и вязких обрабатываемых материалов).

Главный передний угол γ – угол между передней поверхностью резца и плоскостью, перпендикулярной к плоскости резания и проходящей через главную режущую кромку. Он

может быть положительным, равным нулю или отрицательным. На практике принимают $\gamma = -10...+30^{\circ}$. Отрицательные значения – при обработке высокопрочных и твердых материалов.

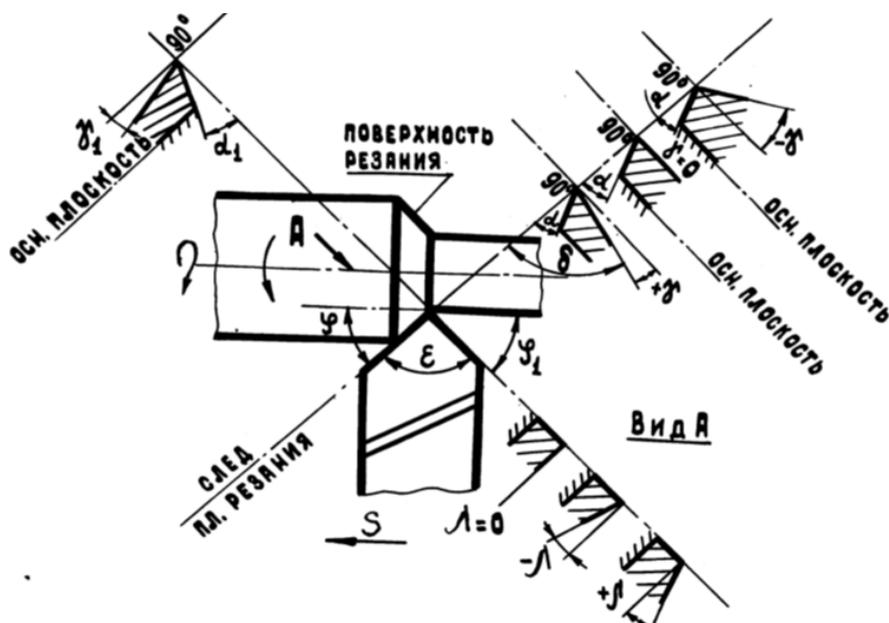


Рисунок 5.10 – Углы токарного резца

Угол заострения β – угол между передней и главной задней поверхностями резца.

Угол резания δ – угол между передней поверхностью и плоскостью резания.

Между углами α , β , γ , δ существуют следующие зависимости (при положительном переднем угле):

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ}; \alpha + \beta = \delta; \delta + \gamma = 90^{\circ}.$$

Вспомогательные задний α_1 и передний γ_1 определяются во вспомогательной секущей плоскости, перпендикулярной к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

Углы в плане резца измеряются в основной плоскости. Главный угол в плане ϕ — угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. У стандартных проходных резцов $\phi=10-90^{\circ}$. Вспомогательный угол в плане ϕ_1 — угол между проекцией вспомогательной режущей кромки и направлением подачи. Обычно $\phi_1 = 10-45^{\circ}$. Угол при вершине резца в плане ϵ — угол между проекциями режущих кромок на основную плоскость $\phi + \epsilon + \phi_1 = 180^{\circ}$.

Угол наклона режущей кромки в пространстве λ - угол между режущей кромкой и линией, проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости. Он считается отрицательным, когда вершина является наивысшей точкой режущей кромки; равным нулю, когда режущая кромка параллельна основной плоскости; положительным, когда вершина является низшей точкой режущей кромки.

Типы резцов

По назначению (виду обработки) все резцы делятся на следующие типы (рисунок 5.11):

проходные – для обработки вдоль оси заготовки (2 - 5 на рисунке 5.11). Они могут быть прямыми, отогнутыми, упорными с углом в плане $\phi = 90^{\circ}$;

подрезные 9 – для обработки поверхностей заготовки в направлении, перпендикулярном или наклонном к оси вращения. Подрезка торца осуществляется с поперечной подачей;

расточные 10 – для обработки внутренних поверхностей (расточки отверстий);

отрезные 7 и *прорезные* (канавочные) – для отрезки заготовки и прорезки канавок;

резьбовые – для нарезания наружных 8 и внутренних резьб;

фасонные 1 – для обработки фасонных (сложного профиля) поверхностей;

галтельные 6 – для протачивания закруглений и плавных переходов и некоторые другие.

По характеру обработки различают черновые (обычные) резцы и чистовые – с широкой прямой и закругленной режущими кромками (6 на рисунке 5.11)

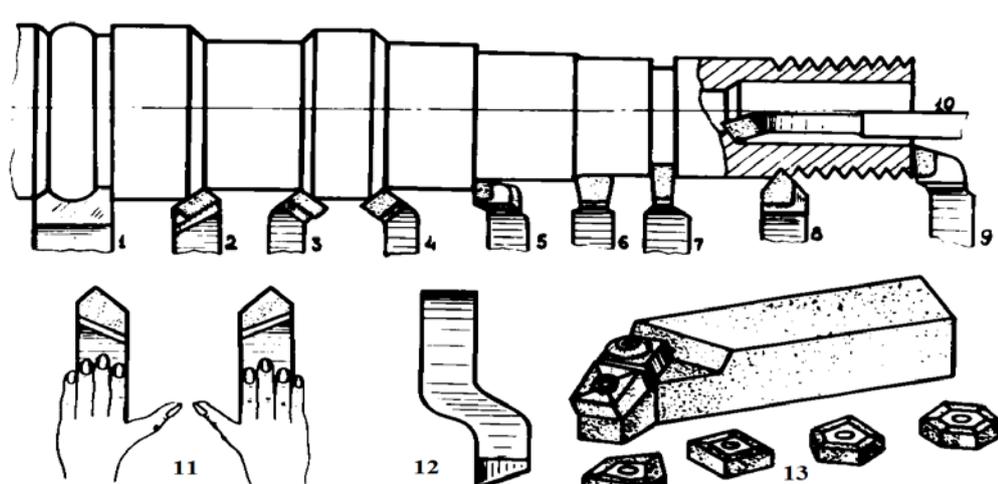


Рисунок 5.11 – Типы токарных резцов: 1 – фасонный; 2 – прямой проходной; 3 - 5 – отогнутые проходные; 6 – чистовой; 7 – отрезной; 8 – резьбовой; 9 – подрезной; 10 – расточной; 12 – строгальный; 13 – сборный со сменными пластинками

По способу крепления режущей части с державкой: цельные, составные неразъемные (паяные) и составные разъемные (с механическим креплением). Резцы малого сечения (револьверные и автоматные) делают цельными из инструментальных сталей. Крупные резцы из инструментальной стали, а также все твердосплавные, минералокерамические и алмазные резцы делаются составными. Державки таких резцов изготавливаются из конструкционных углеродистых сталей (обычно сталь 45), а на головку резца припаивают или механическим путем закрепляют режущую пластинку или вставку с алмазом (13 на рисунке 5.11).

По направлению подачи резцы бывают правые и левые. У правого резца большой палец правой руки, а у левого - левой руки (при наложении ее на резец ладонью вниз) направлен к главной режущей кромке. Правые резцы работают с подачей справа налево, то есть от задней бабки к передней (11 на рисунке 5.11), а левые - наоборот.

По виду материала режущей части различают резцы углеродистые (У10А - У13А), низколегированные (9ХС, ХВГ, ХВ5 и другие), быстрорежущие (Р9, Р18, Р6М5 и другие), твердосплавные (ВК3, ВК8, Т15К6, Т5К10 и другие), минералокерамические, алмазные.

5.5 Точение и строгание

Виды точения и применяемый инструмент

Точение является наиболее распространенным видом обработки при производстве авиационной техники.

Обработка точением позволяет обеспечить следующие показатели точности и шероховатости поверхностей:

черновое точение: 14–12 квалитеты, $R_z = 320\text{--}63 \text{ мкм}$;

получистовое: 12–11 квалитеты, $R_z = 40\text{--}6,3 \text{ мкм}$;

чистовое: 11–10 квалитеты, $R_z = 5\text{--}0,8 \text{ мкм}$;

тонкое (алмазное): 9–6 квалитеты, $R_z = 5\text{--}0,4 \text{ мкм}$.

Основным инструментом для токарных работ служат токарные резцы; для нарезания резьб могут применяться плашки и метчики, а для получения отверстий по оси заготовки – сверла, зенкеры и развертки, устанавливаемые в пиноли задней бабки.

Обточка цилиндрических поверхностей выполняется проходными резцами с продольной подачей.

При отношении длины заготовки к ее диаметру $L/D < 4$ заготовку крепят в трехкулачковом патроне, при $4 < L/D < 10$ свободный конец заготовки поддерживают задним центром, при $L/D > 10$ - в поводковом патроне, кроме того, используют люнеты - подвижный или неподвижный.

Детали неправильной формы (или при обработке поверхностей, не совпадающих с осями симметрии) закрепляют в четырехкулачковых патронах или на планшайбах.

Условия работы резца изменяются в зависимости от положения его вершины относительно линии центров станка (рисунок 5.12):

- при установке резца ниже линии центров уменьшается передний угол, что резко ухудшает условия резания. Задний угол увеличивается, но это не улучшает условий резания;
- при установке резца выше линии передний угол увеличивается (условия резания лучше), а задний угол уменьшается, что усиливает трение резца о заготовку.

Общее правило таково:

а) при черновой (предварительной) обработке резец нужно ставить не-много выше центра, учитывая отжим резца под действием силы резания P_z (величина превышения $h=(0,01 - 0,02)D$, где D - диаметр заготовки);

б) при чистовой (окончательной) обработке, а также при обработке методом копирования (резьбовые, фасонные резцы) инструмент устанавливают строго по центру, во избежание искажения профиля обрабатываемой поверхности. Кроме того, при чистовой обработке силы резания незначительны и отжатия резца практически не происходит.

Для установки резца на глубину резания его подводят до касания с поверхностью вращающейся заготовки, устанавливают лимб поперечной подачи суппорта в нулевое положение и, отведя суппорт вправо, поворачивают рукоятку поперечной подачи на число делений

$$X=t/C,$$

где t – глубина резания, мм;

C – цена деления лимба, мм (при 100 делениях лимба и шаге винта поперечной подачи 5 мм $C= 5/100 = 0,05 \text{ мм}$).

После установки глубины резания заготовку обтачивают на длине 3 - 5 мм, останавливают станок и измеряют диаметр обточенной поверхности штангенциркулем или микрометром; при необходимости вносят поправку и обтачивают заготовку по всей поверхности.

Растачивание отверстий (позиция 10 на рисунке 5.11) выполняют расточными резцами при использовании продольной подачи аналогично обтачиванию наружных поверхностей.

Растачиванию подвергаются отверстия, предварительно полученные в процессе изготовления заготовки (литьем, ковкой, прессованием и т.п.), либо просверленные в сплошной заготовке. Эта операция применяется в следующих случаях:

- когда сверление, рассверливание и зенкерование не обеспечивает необходимой точности размеров;
- при необходимости обеспечить прямолинейность оси отверстия и точность ее положения;
- при отсутствии сверла или зенкера необходимого диаметра;
- при небольшой длине отверстия.

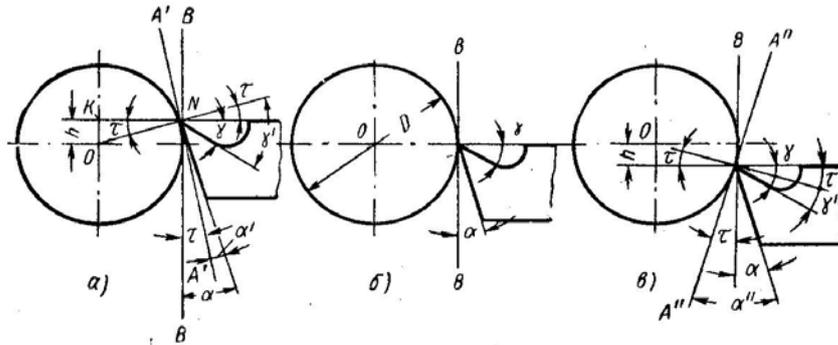


Рисунок 5.12 – Установка резца по высоте центров станка:
 а) резец установлен выше центра; б) по центру; в) ниже центра

Режимы резания при точении

Назначить рациональный режим резания - это значит определить такое оптимальное сочетание глубины резания t , подачи S , скорости резания V и периода стойкости инструмента T , которое обеспечит на данном станке наивысшую производительность и наименьшую себестоимость процесса обработки.

Многочисленными исследованиями доказано, что на температуру в зоне резания, а следовательно, на износ и стойкость резца, наибольшее влияние оказывает скорость резания, меньшее — подача и наименьшее — глубина резания. На основании этого можно сформулировать основные положения о назначении рационального режима резания. Для повышения производительности при заданном периоде стойкости инструмента необходимо работать с возможно большей площадью сечения среза $t \times S$ и соответствующей этому сечению скоростью резания. Причем при заданном сечении среза выгоднее увеличить глубину резания за счет уменьшения подачи.

Таким образом, научно обоснованным является следующий порядок назначения режима резания:

- а) задаются максимально возможной, технологически допустимой глубиной резания;
- б) по выбранной глубине резания назначают максимальную, технологически допустимую подачу;
- в) по выбранной глубине резания и подаче, задавшись величиной периода стойкости инструмента, определяют допустимую скорость резания.

Выбор режимов резания может выполняться на основе расчетов, а также с помощью нормативов.

Выбор глубины резания определяется в основном величиной припуска на обработку. Если нет ограничений по точности (шероховатости) обработанной поверхности, по мощности (прочности) станка, прочности (жесткости) режущего инструмента, то весь припуск снимают за один проход. В противном случае припуск разбивают на черновые и чистовые (получистовые) проходы. При этом глубина резания для чистовых проходов определяется исключительно требованиями к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. В среднем, при получистовом точении ($R_z = 40-10 \text{ мкм}$) $t = 2-0,5 \text{ мм}$; при чистовом ($R_z = 10-2,5 \text{ мкм}$) $t = 0,5-0,1 \text{ мм}$.

Выбор подачи. Целесообразно всегда работать с максимально допустимой подачей; однако она ограничивается: эффективной мощностью или крутящим моментом станка; прочностью самого слабого звена механизма подачи станка; прочностью и жесткостью инструмента и детали; шероховатостью обработанной поверхности.

На практике подача обычно выбирается по нормативам режимов резания, составленным на основе опыта работы машиностроительных заводов. Иногда применяют аналитический метод расчета. В любом случае следует помнить, что если при черновой обработке подача выбирается из условия максимального использования возможностей станка, инструмента и оснастки, то при окончательных (чистовых) операциях она определяется исключительно требованиями точности и шероховатости обработанной поверхности.

Рекомендуемые величины подач при точении приведены в справочной литературе. Подачи, содержащиеся в таблицах, даются независимо от кинематики станка, на котором будет производиться обработка. Поэтому выбранная подача должна быть скорректирована с паспортными данными станка (принимают обычно ближайшую меньшую).

Расчет и выбор скорости резания. После выбора глубины резания и подачи, задавшись определенной величиной периода стойкости режущего инструмента, определяют допустимую скорость резания. Она зависит от целого ряда факторов: стойкости инструмента; обрабатываемого материала; материала и геометрии режущего инструмента; глубины резания и подачи; свойств смазывающе-охлаждающей жидкости; допустимой величины износа режущего инструмента; вида обработки и др.

Общее выражение для скорости резания при точении имеет вид

$$V =$$

Особенности процесса строгания

Строгание (и долбление) применяется для обработки плоскостей и несложных фасонных поверхностей с прямолинейными образующими (шпоночные пазы, канавки, лыски и т.п.). На рисунке 5.13 показаны основные виды строгания: а) - горизонтальных поверхностей; б) - торцевой плоскости; в) - наклонной плоскости; г) - пазов и канавок.

Строгание осуществляется на станках с прямолинейным возвратно-поступательным движением резца (реже заготовки), которое является главным движением резания, и с периодической подачей в направлении, перпендикулярном направлению главного движения резания.

Обработка строганием и долблением позволяет получить следующие показатели точности и шероховатости поверхностей:

черновая обработка: 12 – 13 квалитеты, $RZ= 40-12,5 \text{ мкм}$;

чистовая обработка: 8 – 10 квалитеты, $RZ= 10-3,2 \text{ мкм}$.

Основное достоинство процесса — чрезвычайная простота и дешевизна режущего инструмента (по сравнению с фрезами).

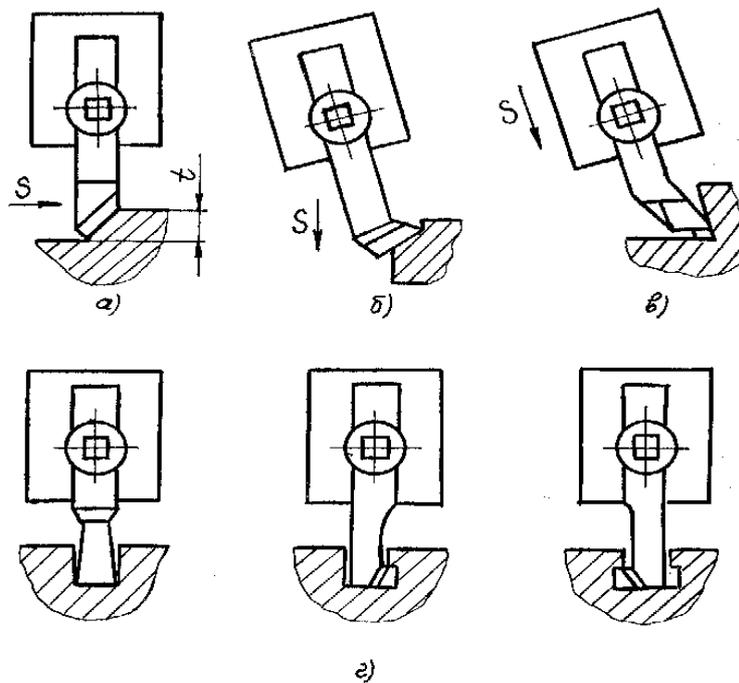


Рисунок 5.13 – Схемы строгания

Процесс резания при строгании и долблении протекает так же, как при точении. Стружкообразование сопровождается упругим и пластическим деформированием, интенсивным трением и выделением тепла, образованием нароста и износом инструмента, повышением твердости. Вместе с тем строгание имеет существенные *особенности*:

1. Прерывистый характер резания. После окончания рабочего хода резец выходит из контакта с обрабатываемой деталью и во время холостого хода охлаждается, что положительно сказывается на его стойкости.

2. Наличие ударных нагрузок. В начале каждого рабочего хода резец испытывает удар о заготовку, что отрицательно сказывается на его прочности и стойкости. Это ограничивает применение хрупких твердых сплавов.

3. Наличие больших сил инерции при реверсировании движущихся частей строгального станка не дает возможности работать на больших скоростях резания (выше 70–80 м/мин).

4. Непроизводительные потери времени на холостые хода снижают производительность процесса.

В качестве режущего инструмента применяют резцы с пластинками из быстрорежущей стали и твердых сплавов повышенной прочности (ВК6, ВК8, Т15К6, Т5К10, ТТ7К12). Для компенсации ударной нагрузки величина сечения у них принимается в 1,25–1,5 раза больше, чем у токарных (для той же глубины резания), передний угол делают на $5-10^{\circ}$ меньше, чем у токарных.

Методика выбора элементов рационального режима резания, при строгании такая же, как и при точении:

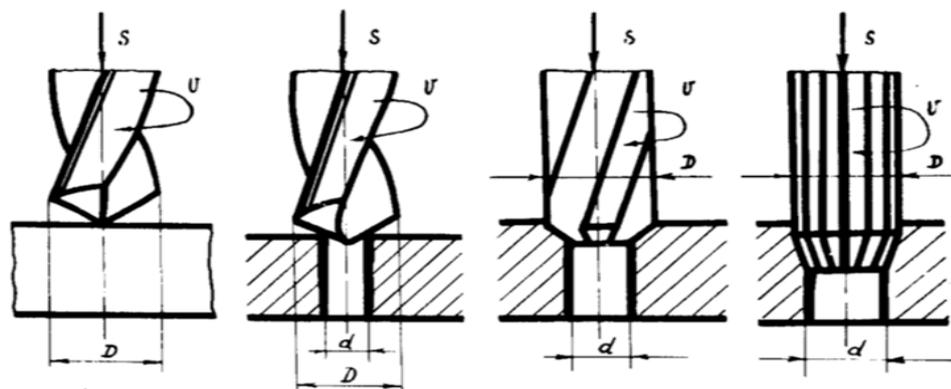
1. Назначается глубина резания в зависимости от припуска, требований к точности и шероховатости поверхности, мощности станка.

2. Выбирается максимальная технологически допустимая подача в зависимости от точности, шероховатости поверхности, прочности резца. Подача имеет размерность: мм/двойной ход.

3. Подсчитывается скорость резания (см. формулы для точения) с учетом ударной и прерывистой работы. Поправочный коэффициент $K_{уд} = 0,75$ (для строгания).

4. По найденной скорости резания определяют соответствующее число двойных ходов в минуту:

$$n =$$



а) сверление

б) рассверливание

в) зенкерование

г) развёртывание

Рисунок 5.14 – Виды обработки отверстий

Для получения точных отверстий в сплошном материале процесс обработки строят по следующей схеме: сначала сверление, затем зенкерование и, наконец, развертывание. При этом после каждой операции (кроме последней) оставляют припуск определенной величины для последующей операции.

Сверление - процесс получения отверстия в сплошном материале. При обработке на универсальных сверлильных станках как главное (вращательное), так и движение подачи (поступательное) совершает инструмент. Заготовка крепится на столе станка и остается неподвижной.

Для сверления отверстий применяют различные типы сверл: спиральные, перовые, центровочные, для глубокого сверления, для кольцевого сверления и некоторые другие. В практике ремонта артиллерийского вооружения наибольшее распространение получили спиральные сверла (рисунок 5.15), состоящие из рабочей части и хвостовика.

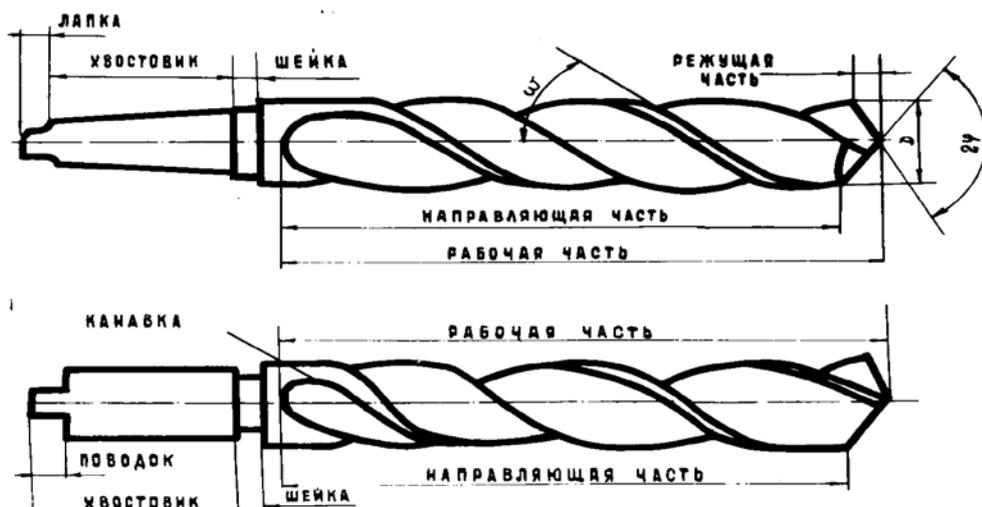


Рисунок 5.15 – Части спирального сверла с коническим (вверху) и с цилиндрическим (внизу) хвостовиком

Рабочая часть снабжена двумя винтовыми канавками и состоит из режущей и направляющей частей.

Режущая часть сверла заточена на конус для образования режущих кромок, выполняющих работу резания. Направляющая часть обеспечивает направление сверла в отверстие за счет винтовой ленточки - выступающей узкой полоски.

Хвостовик (конический или цилиндрический) служит для закрепления сверла в шпинделе станка или патроне и передачи крутящего момента.

Рабочая часть сверла изготавливается обычно из инструментальных сталей (У12А, 9ХС, Р9, Р18, Р6М5 и др.), а хвостовик из конструкционных сталей (40, 45 и др.); эти части соединяются стыковой электроконтактной сваркой или сваркой трением. Применяются также

сверла с напаянными пластинками твердых сплавов (ВК3, ВК8, Т5К10, Т15К6 и др.). Стандартные сверла выпускаются диаметрами от 0,1 до 80 мм.

Геометрические параметры режущей части сверла показаны на рисунке 5.16. Сверло имеет две главные, две вспомогательные и одну поперечную режущие кромки. В отличие от резца передние поверхности сверла винтовые, главные задние - криволинейные, а вспомогательные задние - винтовые ленточки.

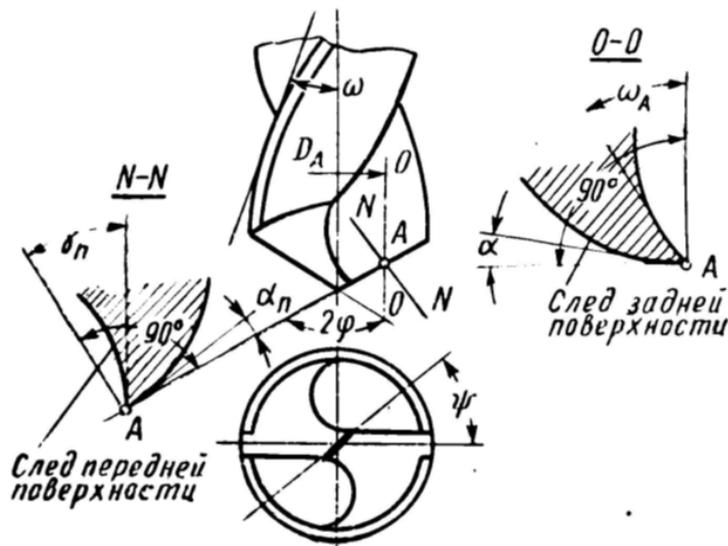


Рисунок 5.16 – Геометрические параметры режущей части спирального сверла

Основными углами сверла являются:

а) *Угол при вершине 2φ* (двойной угол в плане). С уменьшением этого угла увеличивается длина режущей кромки и падает термодинамическая нагрузка на единицу ее длины, что повышает стойкость сверла, однако снижается его прочность. Для обработки сталей средней твердости (стандартные сверла) $2\varphi=118^\circ$; для обработки мягких материалов этот угол уменьшают до $2\varphi=70^\circ$, а твердых - увеличивают до $2\varphi=140^\circ$.

б) *Угол наклона винтовой канавки ω* . Чем больше наклон канавок, тем лучше отводится стружка, но тем меньше прочность и жесткость сверла. У стандартных сверл угол $\omega=20-30^\circ$; у сверл для глубокого сверления (рисунок 5.17) этот угол увеличивают примерно в два раза ($\omega=50-65^\circ$) для лучшего отвода (размещения) стружки. Кроме того, применяют сверла с двумя каналами для внутреннего подвода СОЖ под высоким давлением. СОЖ кроме обычного охлаждающего действия выдавливает стружку по винтовым канавкам сверла. И в том, и в другом случаях отпадает необходимость частого вывода сверла из отверстия для удаления стружки, что повышает производительность.

в) *Передний угол γ* в каждой точке режущей кромки является величиной переменной, так как передняя поверхность винтовая. Он может быть определен так

тяжелые условия работы. Наличие же большого переднего угла на периферии приводит к наибольшему износу этого участка.

г) Задний угол α также переменный, он образуется заточкой сверла. Обычно делают задний угол на периферии $8-14^\circ$, у сердцевин $20-25^\circ$ (из условия более или менее одинакового угла заострения зуба вдоль всей длины режущей кромки).

Из рассмотренного видно, что сверлению, по сравнению с точением присущ ряд особенностей, затрудняющих процесс стружкообразования:

- уменьшение переднего угла по мере приближения к оси сверла;
- тяжелые условия резания у поперечной кромки (угол резания здесь больше 90°);

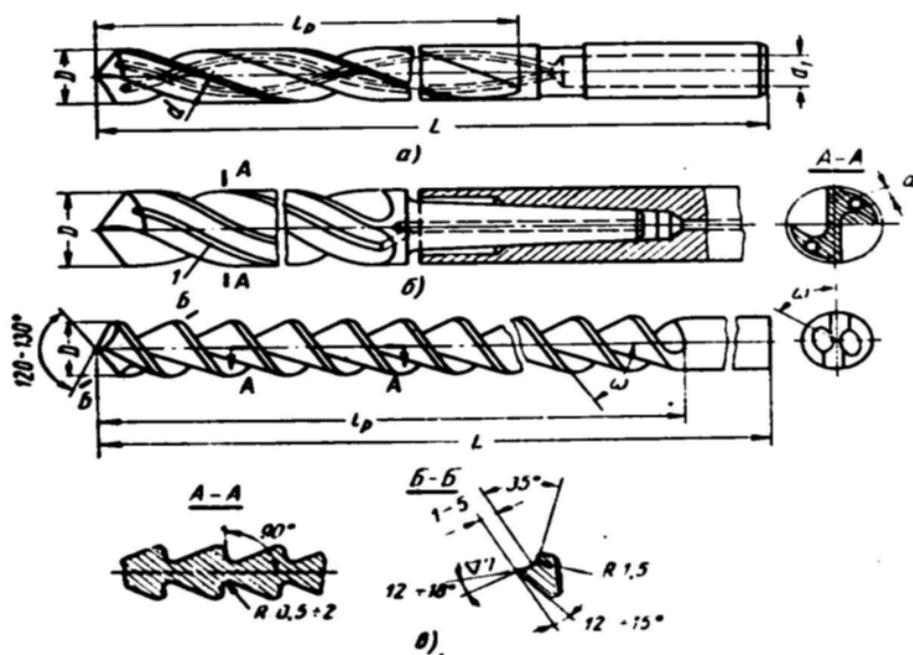


Рисунок 5.17 – Сверла для глубокого сверления:
а, б – с внутренним подводом охлаждающей жидкости; в – с крутой спиралью

- большое трение об обработанную поверхность из-за отсутствия заднего угла на ленточках;
- затруднены отвод стружки и подача СОЖ к режущим кромкам.

С целью облегчения стружкообразования и повышения режущих свойств сверла производят двойную заточку сверла и подточку перемычки и ленточки.

Режимы резания при сверлении

Выбор рационального режима резания сводится к подбору наиболее выгодного сочетания подачи и скорости резания при заданных условиях обработки, при котором процесс сверления будет наиболее производительным и экономичным, полностью будут использованы режущие способности инструмента, кинематические возможности и мощность станка и, в то же время, будут выполнены технические требования к детали (то есть требования чертежа и другой конструкторской документации).

Режим резания при сверлении (рассверливании) назначается по следующей методике:

- выбирается сверло (тип, материал, диаметр) и рациональная геометрия его режущей части, исходя из условий обработки (обрабатываемый материал, глубина сверления и т.п.).

- определяется (по нормативам или расчетным путем) максимально допустимая подача, исходя из свойств обрабатываемого материала, требуемой точности и шероховатости, дальнейшей обработки отверстия. Выбранная подача сверяется с паспортом станка и принимается ближайшая меньшая.
- назначается период стойкости сверла T по нормативам. Например, для быстрорежущих сверл диаметром от 5 до 50 мм стойкость соответственно равна от 15 до 90 мин для стали и от 20 до 140 мин для чугуна;
- по выбранной подаче и стойкости определяется скорость, допускаемая сверлом. Чаще, скорость резания выбирается по нормативам;
- подсчитывается частота вращения шпинделя (сверла), сверяется с паспортом станка и берется ближайшее меньшее.
- определяется крутящий момент на сверле

$$M_{кр} = C_m D X_m S Y_m K_m$$
 и мощность сверления $N_e = M_{кр} n$, которая сравнивается с паспортной мощностью станка ($N_{инт} = N_{об} \eta$).
 Если $N_e > N_{инт}$, то уменьшают n соответственно отношению $N_{инт}/N_e$ и вновь корректируют n по паспорту станка.

Зенкерование и развертывание

Как уже говорилось, сверление является черновой (предварительной) обработкой, так как позволяет получить лишь грубую поверхность с низкой точностью размеров и формы отверстия. Кроме того, имеет место биение и увод сверла от оси (не прямолинейность оси отверстия). Поэтому в тех случаях, когда к качеству обработки предъявляются повышенные требования, после сверления применяют зенкерование, а в случае необходимости и развертывание.

Зенкерование - процесс увеличения размера отверстия с помощью специального инструмента *зенкера*, имеющего 3–6 главных режущих кромок (зубьев).

Зенкеры изготавливаются из быстрорежущей стали, режущая часть оснащается пластинами твердого сплава. По конструкции зенкер (рисунок 5.18) сходен со спиральным сверлом, однако у него отсутствует поперечная режущая кромка и число зубьев (режущих кромок) увеличено до 3–6.

Это предопределяет следующие *особенности* зенкерования по сравнению со сверлением:

- более благоприятные условия резания из-за отсутствия поперечной режущей кромки;
- большая точность размеров и формы отверстия, так как зенкер своими тремя-шестью ленточками точнее направляется в отверстие и обеспечивает прямолинейность оси отверстия лучше, чем сверло;

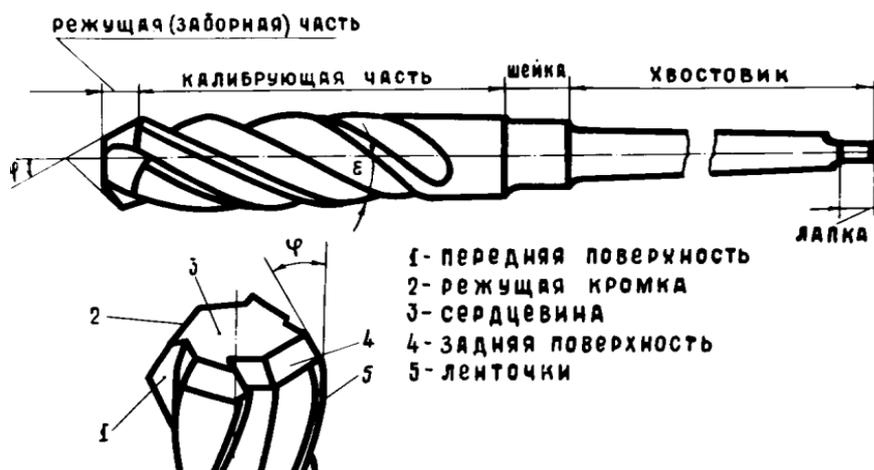


Рисунок 5.18 – Зенкер

- более высокое качество поверхности, так как зенкер по сравнению со сверлом имеет большее количество режущих кромок и на каждую из них приходится меньше толщина стружки;
- зенкер жестче и прочнее сверла, что позволяет увеличить подачу на 1 оборот, то есть повысить производительность.

Благодаря этому зенкерование применяют как для черновой, так и для получистовой обработки предварительно полученных отверстий.

Режимы резания при зенкеровании назначаются также, как и при рассверливании.

Развертывание – процесс окончательной обработки отверстия после зенкерования (реже после сверления) с помощью многозубого режущего инструмента - *развертки* (рисунок 5.19).

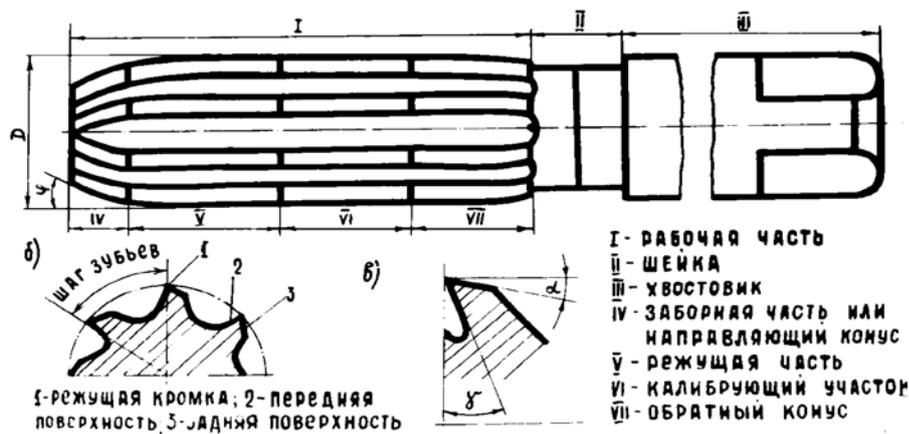


Рисунок 5.19 – Развертка

Процесс развертывания во многом напоминает зенкерование, но имеет *особенности*:

- при развертывании снимается весьма малый слой металла (от 0,05 до 0,25 мм);
- развертка имеет большее по сравнению с зенкером число зубьев (до 14), так что на одну режущую кромку приходится чрезвычайно малая толщина металла.

Все это обеспечивает высокие показатели по точности и чистоте поверхности.

Число зубьев у разверток $Z=4-14$, причем для удобства измерения делается четное число зубьев, но с неравномерным шагом, чтобы избежать огранки обрабатываемого отверстия.

Таким образом, зенкерование и развертывание применяются для более качественной (по сравнению со сверлением) обработки отверстий, полученных ранее различными способами. При этом порядок обработки такой: сначала сверление (если не было отверстия), затем зенкерование и, наконец, развертывание. После каждой операции (кроме последней) оставляют припуск определенной величины для последующей операции.

5.7 Фрезерование и протягивание

Сущность и особенности процесса фрезерования

Фрезерование – процесс обработки резанием с помощью многозубого режущего инструмента – фрезы.

Фрезерование является одним из высокопроизводительных и распространенных методов обработки металлов резанием. Фрезерование применяют для получения плоскостей, пазов, уступов, фасонных поверхностей, резьб, зубьев, шлицев и т. д.

Оно осуществляется при помощи инструмента, называемого фрезой. *Фреза* – многолезвийный инструмент, представляющий собой тело вращения, на образующей поверхности или на торце которого имеются режущие зубья.

В зависимости от конструкции инструмента различают два основных вида фрезерования: цилиндрическое и торцевое (рисунок 5.20).

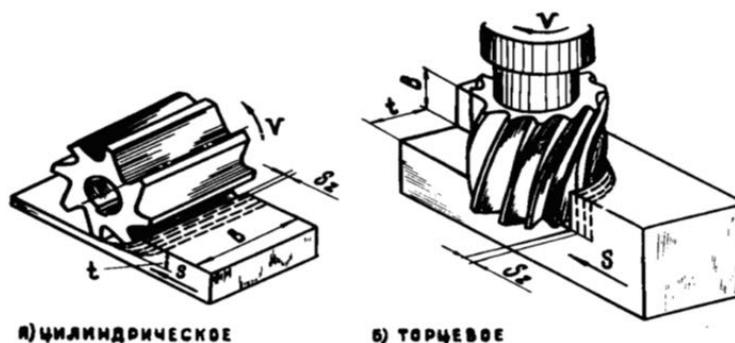


Рисунок 5.20 – Виды фрезерования:
а – цилиндрическое; б – торцевое

При *цилиндрическом* фрезеровании плоскостей ось фрезы параллельна обрабатываемой поверхности; работа производится зубьями, расположенными на цилиндрической поверхности фрезы.

При *торцевом* фрезеровании ось фрезы перпендикулярна обработанной поверхности и работают зубья, расположенные на торцевой и цилиндрической (на глубину резания) поверхностях фрезы.

Несмотря на многообразие типов фрез и конфигураций обрабатываемых поверхностей, схема работы любой фрезы будет соответствовать либо цилиндрическому, либо торцевому виду фрезерования.

Фрезерование разделяют на черновое, получистовое и чистовое (или тонкое).

Средние экономические показатели точности и шероховатости при фрезеровании следующие: при черновой обработке 12–14 квалитеты, $R_z=50-200$ мкм; при получистовой 9–11 квалитеты, $R_z=12,5-50$ мкм; при чистовой 7–9 квалитеты, $R_z=6,3-12,5$ мкм.

Процесс фрезерования осуществляется в результате сложения двух движений: главного – вращательного движения фрезы и движения подачи – прямолинейного перемещения заготовки (реже фрезы) в трех направлениях: продольном, поперечном и вертикальном.

Различают два способа фрезерования:

- встречное фрезерование (против подачи) – вращение фрезы и движение подачи направлены навстречу друг другу (рисунок 5.21, а);
- попутное фрезерование (по подаче) – вращение фрезы и движение подачи происходят в одном направлении (рисунок 5.21, б).

Встречное фрезерование характеризуется тем, что процесс резания начинается с нулевой толщины срезаемого слоя и заканчивается с максимальной толщиной, что обеспечивает более плавную работу, чем при попутном фрезеровании. Кроме того, этот способ создает более благоприятные условия при работе с коркой. Однако, фреза стремится оторвать заготовку от стола станка, что приводит к вибрациям системы СПИД и увеличению

шероховатости поверхности. Кроме того, скольжение зуба по наклепанной поверхности является причиной повышенного износа инструмента.

Попутное фрезерование обеспечивает более высокие показатели чистоты и точности обработки и рекомендуется при работе без корки. Уменьшает интенсивность износа зубьев по задним поверхностям, в силу чего стойкость фрезы увеличивается в 2 – 3 раза.

Равномерность фрезерования. Зуб прямозубой фрезы врезается в заготовку и выходит из нее сразу по всей ширине. Это приводит к резкому изменению площади поперечного сечения среза, а, следовательно, и сил, действующих в процессе резания.

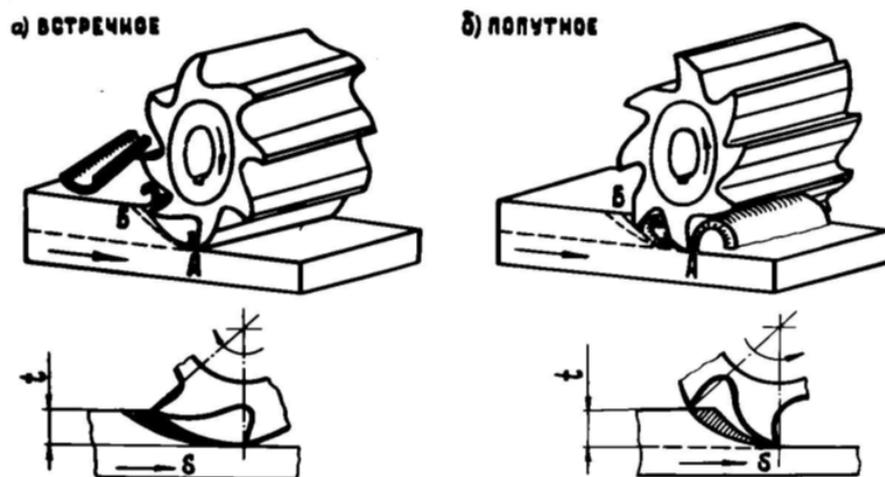


Рисунок 5.21 – Схемы фрезерования: а – встречного; б – попутного

Равномерное фрезерование при определенных условиях можно получить лишь при работе фрезой с винтовыми зубьями, у которой режущая кромка каждого зуба постепенно входит в заготовку, а затем постепенно выходит из нее, что создает более спокойную работу, обеспечивающую получение более качественной поверхности.

Полная равномерность фрезерования будет в том случае, когда ширина фрезерования равна осевому шагу фрезы t_0 или кратна ему в целых числах, то есть

$$B = K t_0.$$

Таким образом, коэффициент K может служить показателем равномерности фрезерования. Его можно выразить через геометрические параметры фрезы

$$K =$$

3. Врезание зуба в заготовку сопровождается ударом, что приводит к снижению стойкости и, в отдельных случаях, к разрушению.

4. Площадь срезаемого слоя может колебаться в широких пределах, вследствие чего силы резания имеют переменное значение.

Основные типы фрез и их назначение

При фрезеровании применяют фрезы, различаемые по технологическим и конструктивным признакам. Некоторые основные типы фрез показаны на рисунке 5.22.

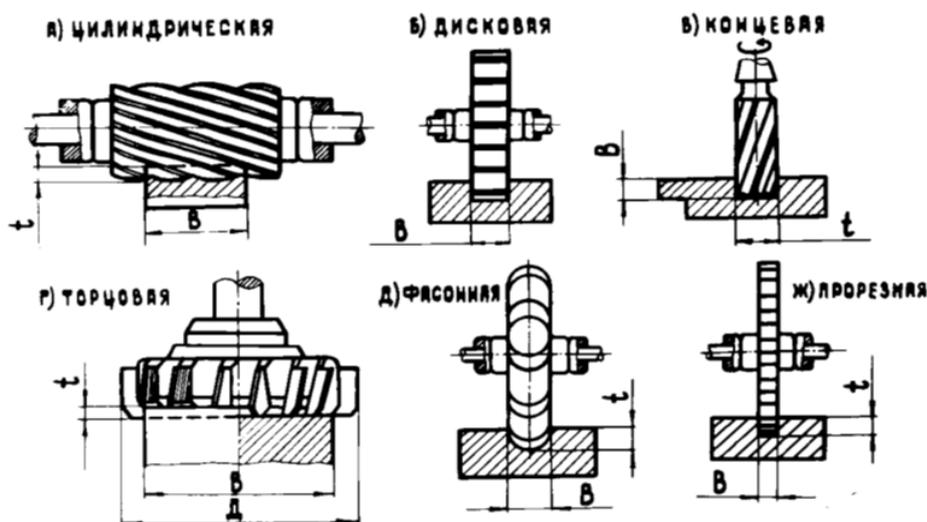


Рисунок 5.22 – Основные типы фрез

Цилиндрические фрезы применяют для обработки открытых поверхностей, параллельных оси фрезы. Ширина фрезы $L=B+10$ мм, где B – ширина фрезерования, мм. Фрезы изготовляют с левыми и правыми винтовыми канавками (правые только для работы в комплекте). Для снижения уровня вибраций режущие кромки цилиндрических фрез выполняют со стружко разделительными канавками, а угловой шаг зубьев делают неравномерным. Составные цилиндрические фрезы применяют преимущественно для черновой обработки плоскостей.

Торцевые фрезы применяют для обработки открытых (особенно длинных и широких) плоскостей, перпендикулярных к оси фрезы. Торцевые фрезы отличаются от цилиндрических, более плавной работой и большей производительностью.

Для обработки широких уступов, когда требуется в сопряжении получить прямой угол, применяют сборные торцево-цилиндрические фрезы.

Концевые или пальцевые фрезы используют при фрезеровании плоскостей, уступов, пазов и криволинейных контуров по разметке и копиру. Концевые фрезы с нормальными зубьями предназначены для обработки сталей и чугунов, а с крупными зубьями - в основном для обработки алюминиевых, магниевых, медных и других цветных сплавов с хорошей обрабатываемостью. Их целесообразно также применять при фрезеровании пазов в вязких сталях, когда применение других фрез приводит к запрессовке стружки в канавках.

Дисковые фрезы применяют для фрезерования уступов, пазов, лысок, многогранников и т.п.

Дисковые фрезы, имеющие зубья только на цилиндрической поверхности (пазовые или односторонние), используют при фрезеровании точных шпоночных канавок и пазов. Особо точные пазы обрабатывают затылованными пазовыми фрезами.

При фрезеровании глубоких и точных пазов применяют трехсторонние дисковые фрезы.

Двусторонние цельные и сборные дисковые фрезы изготавливают с правым и левым направлениями стружечной канавки. Цельные насадные двусторонние фрезы выполняют с криволинейной спинкой.

При обработке глубоких пазов и уступов за один проход на фрезерных станках недостаточной мощности применяют ступенчатые дисковые фрезы.

Прорезные и отрезные дисковые фрезы (пилы) служат для прорезания различного рода узких пазов и для резки материала.

Угловые фрезы применяются для фрезерования стружечных канавок инструментов, а также скосов. Различают следующие типы угловых фрез: одноугловые для обработки стружечных канавок затылованных фрез; двухугловые несимметричные и симметричные; дисковые односторонние (правые и левые); концевые для пазов типа "ласточкин хвост". Угловые фрезы изготавливают цельными с остроконечными зубьями.

Фасонные фрезы предназначены для фрезерования стандартных фасонных поверхностей (полукруглых, выпуклых, вогнутых), а также стружечных канавок режущих инструментов. Для серийного производства их изготавливают с зубьями, затылованными по архимедовой спирали. Фрезы для обработки легких сплавов отличаются малым числом зубьев (двузубые и трехзубые концевые фрезы, четырех-, восьмизубые торцевые и дисковые фрезы).

Специальные фрезы применяют для резьбо- и зубонарезания (модульные червячные, модульные дисковые и пальцевые), для фрезерования шлицев и т.п.

Наборы фрез подбирают по профилю и размерам обрабатываемой детали и закрепляют на одной общей оправке.

По конструкции фрезы бывают: цельные (с мелкими и крупными зубьями); сборные со вставными ножами из быстрорежущей стали и с напаянными пластинками из твердого сплава, а также насадные, имеющие отверстия для посадки на оправку фрезерного станка и хвостовые, имеющие цилиндрические или конические хвостовики.

Обработка производится на универсальных станках: горизонтального типа - цилиндрическими, дисковыми и другими фрезами (цилиндрическое фрезерование) и вертикального типа - торцевое фрезерование.

Геометрические параметры цилиндрической фрезы с винтовыми зубьями показаны на рисунке 5.23.

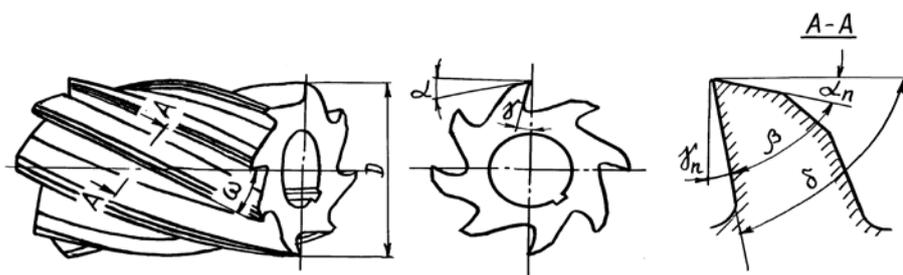


Рисунок 5.23 – Элементы цилиндрической фрезы с винтовыми зубьями

На этом рисунке:

γ – передний угол в торцевой плоскости,

α – задний угол в торцевой плоскости,

ω – угол наклона стружечной канавки,

D – диаметр фрезы.

Протягивание

Протягиванием называется процесс обработки резанием с помощью *протяжки* – многозубого инструмента, у которого подача заложена в самой конструкции, так как каждый последующий зуб выше предыдущего (рисунок 5.24). Протягивание осуществляется с помощью одного движения – прямолинейного перемещения инструмента.

Протягиванием можно обрабатывать сквозные отверстия любой формы (круглые, шлицевые, квадратные, эвольвентные и т.д.), прямые и винтовые канавки (например, шпоночные, винтовые нарезы в канале полых деталей и т.п.), а также наружные поверхности разнообразной формы, зубчатые колеса внутреннего и наружного зацепления.

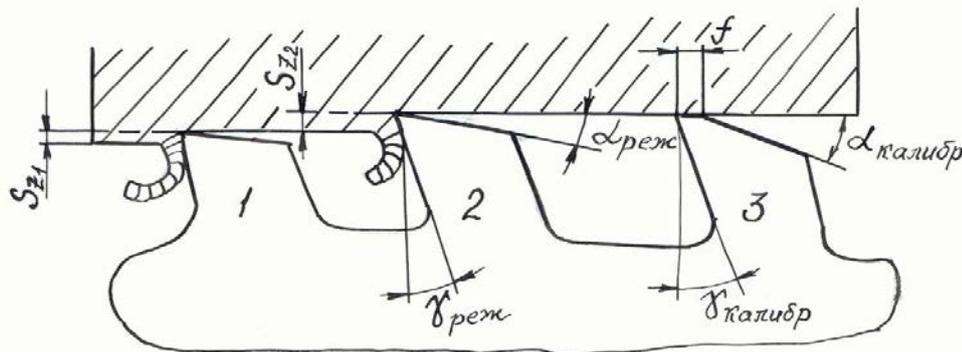


Рисунок 5.24 – Схема резания протяжкой:
1, 2 – режущие; 3 – калибрующие зубья

Протягивание обеспечивает очень высокую производительность, высокую точность (9–7 квалитет) и чистоту поверхности (до $Ra=0,32-0,16$ мкм).

Схема работы круглой протяжки показана на рисунке 5.25.

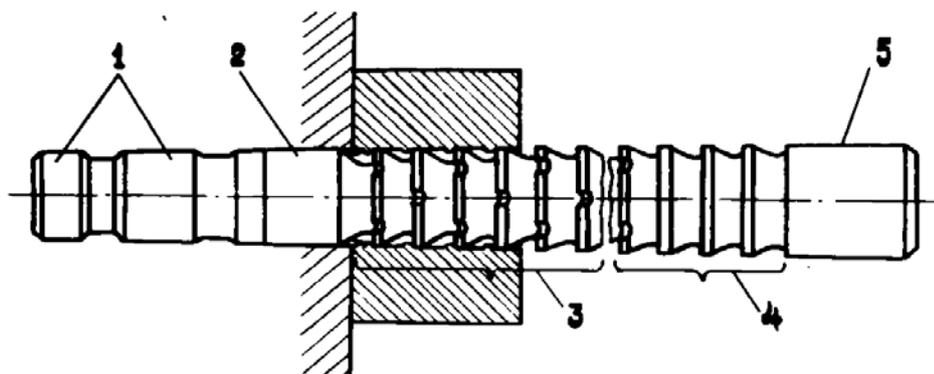


Рисунок 5.25 – Схема работы круглой протяжки

Протяжка состоит из следующих основных частей:

- хвостовик 1 служит для закрепления протяжки в патроне протяжного станка;
- передняя направляющая часть 2 предназначена для направления протяжки в начале ее работы по предварительно обработанному отверстию;
- режущая часть 3, на которой расположены зубья, срезающие основной припуск;
- калибрующая часть 4, на которой расположены зубья, калибрующие отверстие и обеспечивающие, необходимую точность и шероховатость поверхности;

- задняя направляющая часть 5, служащая для удержания протяжки от провисания и перекоса в конце процесса протягивания (в момент выхода последнего зуба).

Число режущих зубьев определяется соотношением припуска на обработку и подачей на зуб. Подача на зуб принимается в пределах 0,02–0,2 мм в зависимости от обрабатываемого материала, типа протяжки, требований к качеству и т.п.

Значения переднего и заднего углов выбираются в зависимости от вида операции (черновая или чистовая) и типа протяжки. Так для круглого протягивания стали $\alpha = 30^\circ$, $\gamma = 16\text{--}18^\circ$ (для режущих зубьев) и $\alpha = 1^\circ$, $\gamma = 5^\circ$ (для калибрующих зубьев). Малое значение заднего угла объясняется тем, что при больших значениях α переточка по передней поверхности вызовет значительное изменение размера протяжки.

Число калибрующих зубьев обычно выбирается от 3 до 8, большее значение – для обработки более точных отверстий. Калибрующие зубья фактически не режут, а зачищают (калибруют); на них делается цилиндрическая ленточка шириной $f=0,05\text{--}0,2$ мм.

Для облегчения резания на режущих зубьях протяжки делаются стружко разделительные канавки (для деления широкой стружки на отдельные части).

Зубья калибрующей части канавок не имеют.

Выбор режима резания при протягивании сводится к назначению скорости резания, так как подача и ширина среза обусловлены конструкцией протяжки.

При протягивании применяют низкие скорости резания (1–12 м/мин) для того, чтобы повысить стойкость очень дорогого инструмента. Увеличение скорости не дает заметного увеличения производительности труда, так как вспомогательное время значительно превышает машинное.

Рассмотренные технологические процессы обработки металлов, металлических сплавов и различных конструкционных материалов резанием находят широкое применение в самолетостроении и народном хозяйстве.

5.8 Шлифование металлов

Сущность и особенности процесса

Шлифование – процесс резания при помощи инструмента, режущим элементом которого являются зерна абразивного материала. *Абразив* (от латинского "абразиво" – соскабливание) – мелкозернистое или порошкообразное вещество высокой твердости, износостойкости и теплостойкости (до 2050°C).

Эти зерна (порошки) соединены специальными связующими веществами в тела определенной формы: круги, бруски, шкурки, головки и т.п. Применяют также пасты и порошки.

Абразивный инструмент позволяет обрабатывать материалы любой твердости (закаленные стали, стекла, керамику, твердые сплавы и т.п.) с высокой точностью и качеством поверхности, а также осуществлять заточку всевозможного режущего инструмента.

Сущность процесса показана на рисунке 5.26. Выступающие зерна абразивного материала, прочно закрепленные в шлифовальном круге связующим (цементирующим) веществом, при вращении круга с большой скоростью (до 90 м/с) срезают (соскабливают) слой металла в виде очень мелкой стружки.

Большое число стружек (до сотни миллионов в минуту) и их малая толщина (несколько микрометров) обуславливаются малым размером самих режущих зерен и большим их количеством, одновременно участвующих в срезании (царапании) материала.

Вследствие малого сечения среза и большой скорости резания абразивная обработка обеспечивает исключительно высокую точность и качество поверхности. Чем дисперснее (мельче) зерна — тем выше качество обработки.

Процесс стружкообразования при шлифовании больше всего приближается к резанию, осуществляемому зубом фрезы. Несмотря на малые размеры срезаемого слоя, получаемая при шлифовании стружка имеет то же строение и вид, что и стружка, получаемая при фрезеровании. Здесь также имеют место упругое и пластическое деформирование, тепловыделение, упрочнение, износ и др. Однако, процесс резания металлов шлифованием, кроме общих закономерностей, имеет свои *особенности*, из которых можно выделить следующие:

1. Высокая скорость резания. При обычном шлифовании скорость резания составляет $30\text{--}35\text{ м/с}$, а при скоростном 90 м/с и более. Это в десятки раз превышает скорость резания при токарной обработке. Процесс снятия стружки абразивным зерном осуществляется примерно за $10^{-4}\text{--}10^{-5}$ секунд, то есть практически мгновенно.

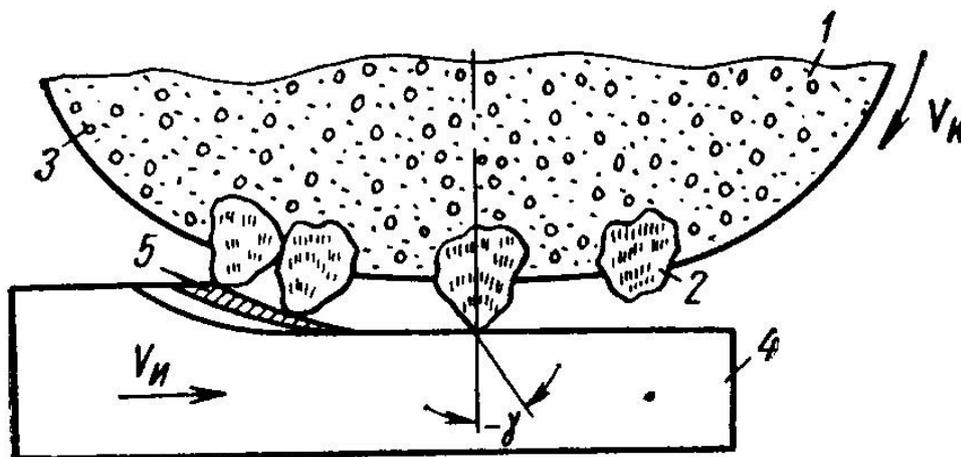


Рисунок 5.26 – Схема абразивной обработки

2. Сильное размельчение и своеобразный характер снимаемой стружки. Число абразивных зерен, расположенных на периферии шлифовального круга, очень велико, оно измеряется на кругах средних размеров десятками и сотнями тысяч штук. Поэтому при шлифовании стружка снимается огромным числом беспорядочно расположенных режущих зерен, к тому же неправильной формы, что приводит к очень сильному размельчению стружки и вызывает большой расход энергии. Затрата энергии на единицу объема снимаемого материала при шлифовании в 5–10 раз больше, чем при обработке лезвийным инструментом, поэтому на абразивную обработку целесообразно оставлять малый припуск.

3. Невыгодная геометрия режущих зерен шлифовального круга. Если при работе с лезвийными инструментами их режущей части можно придать наиболее выгодную геометрию, то с зернами шлифовального круга этого сделать нельзя. Абразивные зерна в подавляющем большинстве имеют отрицательные углы резания.

4. Самозатачивание шлифовального круга. Под действием повышенной нагрузки затупленное зерно может расколоться или выкрошиться из связки, обнажив новые острые зерна, которые и будут продолжать резание.

5. Очень высокая температура при шлифовании (до 1500⁰ С и выше) возникает в результате невыгодной геометрии режущей части зерен и большой скорости резания. Из-за плохой теплопроводности круга почти все тепло переходит в деталь и стружку (часть стружки даже сгорает). Это вызывает прижоги на детали, структурные изменения, деформации. Поэтому шлифование проводят при обильном охлаждении (кроме чугуна).

Характеристика применяемого инструмента

Режущий инструмент, применяемый для шлифования (и другой абразивной обработки) характеризуется: видом абразива, зернистостью, видом связки, твердостью инструмента, его формой и др.

а) Абразивные материалы делятся на следующие:

Электрокорунды состоят из оксида алюминия Al₂O₃ (92–99,7%) и примесей. В зависимости от химического состава различают:

- электрокорунд нормальный, получаемый электролизом из бокситов, его разновидности 12А, 13А (92% Al₂O₃), 14А (93%), 15А, 16А;
- электрокорунд белый, выплавляемый из глинозема: 22А, 23А, 24А, 25А;
- электрокорунд хромистый (технический рубин) марок 32А, 33А, 34А;
- электрокорунд титанистый (технический сапфир) 37А. Оксиды хрома и титана упрочняют решетку оксида алюминия и одновременно придают зерну высокую вязкость;
- монокорунд 43А, 44А и 45А особенно эффективен при обработке жаропрочных сталей. Получается по особой технологии с выделением монокристаллов корунда (каждая частица — монокристалл, в отличие от предыдущих).

Карбид кремния содержит 97–99% SiC и получается из кокса и кварцевого песка в электропечах.

Карбид кремния черный 52С, 53С, 54С и 55С и карбид кремния зеленый 62С, 63С и 64С очень ценные абразивные материалы, так как обладают самой высокой теплостойкостью (2050⁰ С), исключительно высокой твердостью (уступает только алмазу, эльбору и карбиду бора), высокой абразивной способностью (зерна имеют острые грани).

Алмазы: естественный (А) и синтетические (АС) марок АСО, АСП, АСВ, АСК, АСС обладают самой высокой твердостью, но сравнительно невысокой теплостойкостью.

Использование их для обработки сталей и чугунов нецелесообразно, так как при 7500С алмаз

(углерод) растворяется в железе. Применяют алмазы для точной обработки деталей из цветных сплавов, пластмасс, полупроводников, твердых сплавов, керамики, стекла и т.п.

Эльбор (кубический нитрид бора КНБ) получается по той же технологии, что и синтетический алмаз. Практически не уступает алмазу по твердости, но превосходит его по теплостойкости (1500°C), абсолютно нейтрален по отношению к железу.

б) Зернистость абразивных материалов.

Абразивные материалы дробятся в шаровых мельницах, после чего рассеиванием на ситах сортируются (классифицируются) по размерам. Размеры зерен колеблются от 3,5 до 2500 мкм. В зависимости от размера зерна ГОСТ 3647-81 устанавливает следующие их номера (зернистость):

Шлифзерно 200, 160, 125, 100, 80, 60, 50, 40, 32, 25, 20, 16.

Шлифпорошки 12, 10, 8, 6, 5, 4.

Микропорошки М63, М50, М40, М28, М20, М14, М10, М7, М5.

Цифра, обозначающая номер зернистости, показывает размер зерна и шлифпорошка в сотых долях миллиметра, а микропорошка - в микрометрах.

в) Однородность. зернового состава (индекс зернистости) - процентное содержание основной фракции.

Обозначается буквой (дополнительно к зернистости):

В – 55, 60% (высокая),

П – 45, 50, 55% (повышенная),

Н – 40, 43, 45% (нормальная),

Д – 36, 37, 39, 41, 42% (допустимая).

г) Связки.

Для соединения зерен в одно целое применяют связующие (цементирующие) вещества, так называемые связки. От связки зависит прочность удержания зерна в круге и прочность самого круга, при вращении которого возникают большие центробежные силы. Наибольшее применение нашли:

- *керамическая связка* (К), состоящая из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца, мела, талька, имеет наибольшую пористость и поэтому меньше засаливается, водостойка, допускает применение охлаждения. Недостаток – хрупкость. Наиболее распространена. Марки: К0, К1, К3, К5, К7, К8;

- *силикатная связка* (С) изготавливается из жидкого стекла с оксидом цинка, мелом, глиной и пр. Не допускает применения охлаждения;

- *бакелитовая связка* (Б) на основе фенолоформальдегидной смолы (бакелита). Обеспечивает очень высокую прочность, но при температурах более 300°C начинает выгорать. Чаще всего применяется в кругах для резки (толщиной от 0,5 мм). Охлаждающая жидкость не должна содержать щелочи. Марки: Б, Б1, Б2, Б3, Б4;

- *вулканитовая связка* состоит из синтетического каучука, обладает максимальной упругостью, применяется для абразивной прорезки и для ведущих кругов (В, В1, В2, В3);

- *глифталева* ГФ.

Кроме того, применяются *металлическая* (для алмазных кругов), *магнезиальная* и некоторые другие.

д) Твердость абразивного инструмента.

Под твердостью абразивного инструмента понимается способность удерживать зерно в круге при воздействии на него внешних усилий. Твердость — важная характеристика абразивного инструмента. Слишком твердый круг будет давать прижоги и требовать частой правки, так как затупившиеся зерна не будут выкрашиваться (самозатачиваться). Слишком

мягкий круг будет осыпаться, то есть быстро менять форму и размеры. Поэтому для каждого конкретного случая требуется инструмент определенной твердости.

На выбор твердости шлифовального круга оказывает влияние самозатачивание круга в процессе шлифования. Поэтому, чем тверже обрабатываемый металл, тем мягче должен быть круг и наоборот (при прочих равных условиях).

ГОСТ 3151-81 устанавливает стандартную шкалу твердости:

Мягкий - М1, М2, М3;
средне мягкий - СМ1, СМ2;
средний - С1, С2;
средне твёрдый - СТ1, СТ2, СТ3;
твёрдый - Т1, Т2;
весьма твёрдый - ВТ1, ВТ2;
чрезвычайно твёрдый - ЧТ1, ЧТ2.

е) Структура шлифовального круга.

Под структурой понимают соотношение зерен, связки и пор в единице объема.

Установлено восемнадцать номеров структуры:

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Номер структуры | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Объем зерен, % | 62 | 60 | 58 | 56 | 54 | 52 | 50 | 48 | 46 | 44 | 42 | 40 | 38 |

Номера 0–3 имеют плотную структуру, 4–8 – среднюю, 9–12 – открытую. Структуры номеров 13–18 (высокопористые) применяют для обработки мягких и вязких материалов (медь, алюминий, резина, дерево и т.п.).

ж) Форма шлифовальных кругов.

По ГОСТ 2424-81 предусматривается 22 профиля кругов диаметром от 3 до 1100 мм, с диаметрами отверстий от 1 до 305 мм. Наиболее распространенными являются круги (рисунок 5.27):

- прямого плоского профиля ПП;
- плоские с выточкой ПВ, с двойной выточкой ПВД;
- чашечные цилиндрические ЧЦ;
- чашечные конические ЧК;
- плоский с двухсторонним коническим профилем 2П;
- тарельчатые 1Т, 2Т, 3Т;
- кольцевые К;
- дисковые Д и другие.

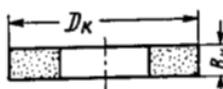
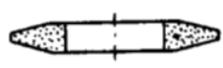
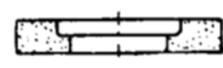
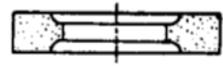
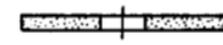
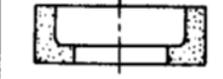
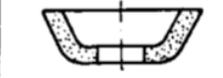
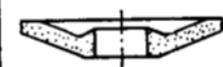
| Виды кругов | Форма сечения | Обозначение | Назначение |
|--|---|-------------|---|
| Плоские прямого профиля |  | ПП | Для круглого шлифования тел вращения и плоского шлифования периферией круга |
| Плоские с двусторонним коническим профилем |  | 2П | Для шлифования резьбы, зубьев зубчатых колес, профильных канавок |
| Плоские с выточкой |  | ПВ | Для круглого шлифования периферией круга и подрезки торца |
| Плоские с двусторонней выточкой |  | ПВД | |
| Диски |  | Д | Для разрезания и шлифования канавок |
| Чашки цилиндрические |  | ЧЦ | Для плоского шлифования торцом круга |
| Чашки конические |  | ЧК | |
| Тарелка |  | Т | Для заточки инструмента (зубьев фрез, разверток, зенкеров и др.) |

Рисунок 5.27 – Форма шлифовальных кругов.

з) **Класс точности круга** (допуски на погрешность формы и размеров):

АА – точный (прецизионный);

А – нормальный;

Б – грубый.

и) **Класс дисбаланса** (неуравновешенность массы): первый, второй, третий, четвертый.

Основные характеристики круга (на кругах диаметром больше 40 мм) наносятся несмываемой краской на его поверхность в виде условных обозначений.

Пример. Маркировка 24А 40 СМ2 К5 5 ПП 600×20×305 35 м/с означает: круг изготовлен из электрокорунда белого, имеет зернистость № 40 (размер зерен 0,40 мм), средне-мягкий второй, связка керамическая, структура № 5, профиль – прямой плоский с размерами: 600 мм (наружный диаметр), 20 мм (ширина), 305 мм (диаметр отверстия), допускаемая скорость резания до 35 м/с.

Основные виды абразивной обработки

Область применения процесса шлифования весьма широка. Шлифованием выполняют:

- точную чистовую обработку деталей (отделочные или финишные операции);
- обработку (в том числе и черновую) твердых и сверхтвердых материалов (закаленных сталей, твердых сплавов, керамики, стекла и т.п.);
- заточку разнообразного инструмента.

Для осуществления процесса шлифования необходимо, чтобы деталь и абразивный инструмент имели соответствующие относительные движения.

Основными видами шлифования являются: круглое наружное; круглое внутреннее; плоское; бесцентровое; специальное (резьбо-, зубо-, шлицешлифование и др.); отделочное или финишное (полирование, хонингование, доводка, притирка, суперфиниширование).

Наружное круглое шлифование производится, как правило, в центрах шлифовального станка; оно предназначено для обработки цилиндрических, а также конических и фасонных наружных поверхностей. Имеется три основных способа такого вида шлифования: шлифование с продольной подачей; глубинное шлифование; с поперечной подачей (врезанием).

Шлифование с продольной подачей (рисунок 5.27, а) осуществляется быстрым вращением круга 1, сравнительно медленным встречным вращением детали 2, продольной подачей детали и поперечной подачей круга.

Шлифование с поперечной подачей методом врезания (рисунок 5.27, б) является высокопроизводительным и применяется при обработке жестких деталей небольшой длины, а также при фасонном шлифовании. Ширина круга перекрывает длину шлифуемой поверхности. Деталь только вращается, а круг вращается и одновременно перемещается в поперечном направлении с подачей $S_n=0,01-0,05$ мм/об.

Глубинный метод шлифования заключается в работе с большими глубинами резания (рисунок 5.27, в). Весь припуск снимается за один-два продольных хода с небольшой подачей ($S=1-6$ мм/об). Круг имеет конусный участок шириной в 10–15 мм под углом $\alpha=2-50$. Чем меньше α , тем больше поверхность контакта круга с деталью, тем лучше условия работы круга, но больше радиальные силы. Конусная часть выполняет основную работу шлифования, а цилиндрическая – зачищает поверхность; этим обеспечиваются высокая производительность и качество обработки.

Рассмотрим элементы режима резания при наружном круглом шлифовании с продольной подачей (см. рисунок 5.27, а):

а) Глубина резания (поперечная подача) измеряется в направлении перпендикулярном к обработанной поверхности и представляет слой металла, снимаемый за один продольный ход:

$$t =$$

движение V_u (круговая подача), круг – вращательное движение V_k , продольную подачу S и периодическую радиальную подачу S_t (на врезание).

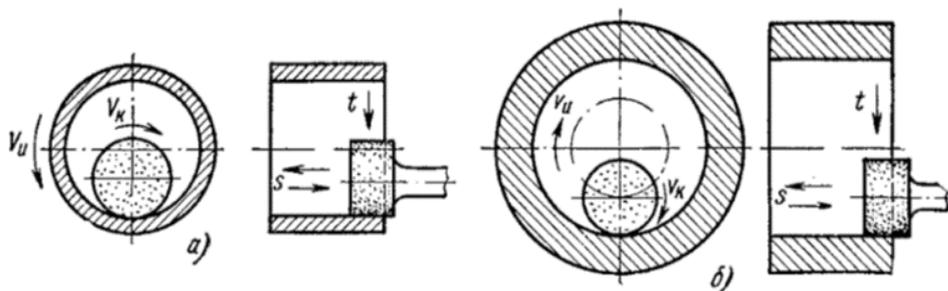


Рисунок 5.28 – Внутреннее круглое шлифование.

Шлифовальный круг и заготовка вращаются обычно в разные стороны. Для получения необходимой скорости круга диаметр его должен быть возможно большим, поэтому рекомендуется $D_k = (0,6-0,9)D$, где D_k – диаметр круга, D – диаметр обрабатываемого отверстия.

Плоское шлифование применяется для обработки плоскостей и может производиться периферией (рисунок 5.29, а) или торцом круга (рисунок 5.29, б).

Шлифование торцом круга является более производительным, так как одновременно обрабатывается более широкая поверхность.

Бесцентровое шлифование применяется для обработки, как наружных, так и внутренних поверхностей вращения; оно может осуществляться двумя способами: на проход и врезанием.

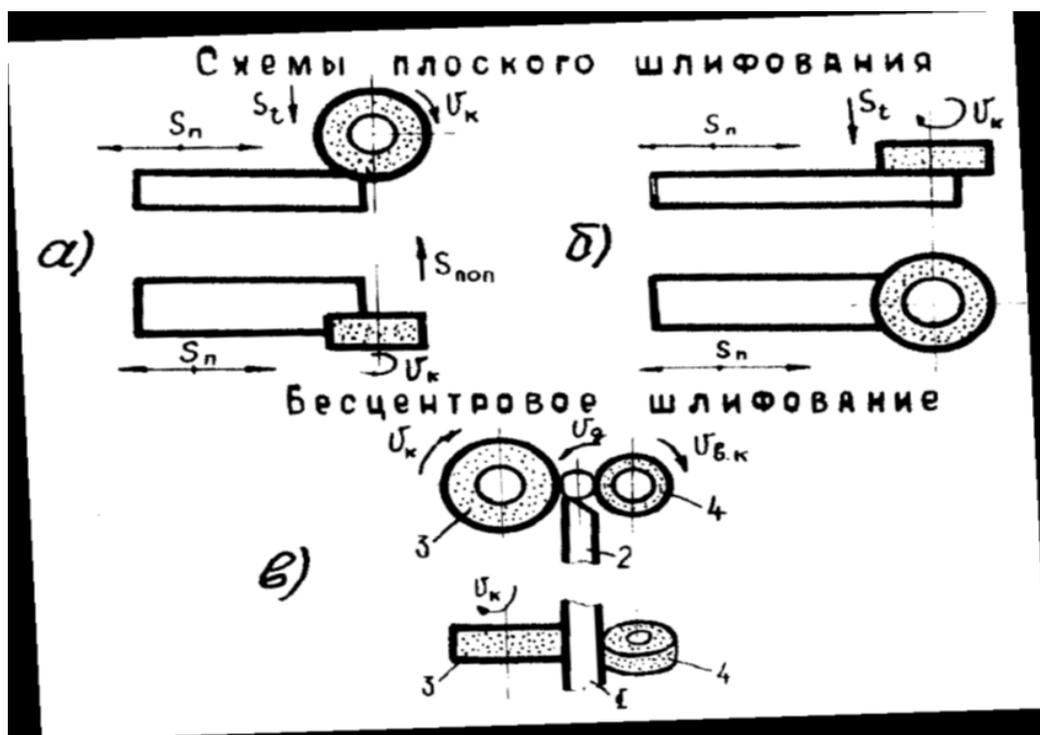


Рисунок 5.29 – Схемы плоского и бесцентрового шлифования

Рассмотрим схему бесцентрового наружного шлифования на проход (рисунок 5.29, в), которое применяется для шлифования длинных цилиндрических заготовок в случае невозможности обработки их в центрах.

Заготовку 1 устанавливают на опорный нож 2 между двумя кругами, из которых один - шлифующий 3 производит обработку детали, а другой - ведущий (направляющий) 4

осуществляет вращение детали (круговую подачу) и ее продольное перемещение. Ведущий круг делается на вулканитовой связке, что повышает его сцепляемость; скорость его вращения 20–50 м/мин Шлифовальный круг вращается в 75–80 раз быстрее (до 50 м/с), что обеспечивает его проскальзывание относительно заготовки и шлифование последней.

Заточка режущего инструмента производится как на специализированных, так и на ручных (простейших) заточных станках. Качество заточки инструмента существенно влияет на его стойкость и качество обработанной детали. Чистота поверхности режущих кромок должна быть выше, чем у детали по чертежу, поэтому после заточки рекомендуется провести доводку поверхностей режущего инструмента.

Инструмент, изготовленный из стали (углеродистой, быстрорежущей) затачивают шлифовальными кругами из электрокорунда белого (22А - 25А) на керамической связке (К) зернистостью 80–50 (предварительная обработка) или 40–25 (окончательная обработка) со скоростями резания 20–45 м/с. Желательно обильное охлаждение.

Твердосплавный и минералокерамический инструмент рекомендуется затачивать на кругах из карбида кремния зеленого (62С–64С) на керамической (К) или бакелитовой (Б) связке зернистостью 40–25 (предварительно) и 20–12 (окончательно). Заточка должна проводиться либо с непрерывным охлаждением, либо вовсе без него. Категорически запрещается прерывать охлаждение (или окунать в воду нагретый инструмент), так как эти материалы обладают повышенной чувствительностью к термическим деформациям.

Доводка заточенного инструмента производится на чугунных дисках с применением пасты ГОИ или алмазных кругов на металлической или бакелитовой связках. В ремонтных условиях практикуют также ручную доводку резцов мелкозернистыми брусками.

Финишные (отделочные) способы обработки материалов приобретают все большее значение, поскольку обеспечивают исключительно высокую точность и качество поверхностей деталей. К ним относятся: тонкое шлифование, полирование, хонингование, суперфиниширование, притирка, доводка.

Тонкое шлифование применяют для получения особо высокой точности и низкой шероховатости цилиндрических и плоских деталей. Тонкое шлифование выполняют на станках высокой и особо высокой точности с повышенной жесткостью конструкции; при этом достигается точность размеров выше 5–6 квалитетов, отклонение формы (некруглость, овальность, огранка, нецилиндричность) в пределах 0,3–0,5 мкм, шероховатость в пределах $R_a=0,025-0,040$ мкм.

Лучшие результаты по производительности, точности и шероховатости поверхности дает тонкое шлифование алмазными абразивными кругами.

Ленточное шлифование – процесс шлифования лентами на бумажной или тканевой основе, покрытыми абразивными зёрнами. На основу ленты наносят абразивный слой толщиной до 3 мм, который соединяется с основой посредством специального клея или синтетических смол. Зернистость абразива зависит от вида шлифования: при грубом шлифовании 8 – 16, при отделочном от 12 до 3. При зернистости 16 – 10 можно получить поверхность до $R_z = 1,25-0,8$ мкм, при зернистости 5 получают до $R_z = 0,32 - 0,2$ мкм, а при зернистости 3 до $R_z = 0,16-0,1$ мкм. Величина снимаемого слоя при ленточном шлифовании может достигать до 0,75–1,5 мм. В качестве смазывающе-охлаждающих жидкостей применяют 2,5–5 % раствор эмульсола.

Ленточное шлифование применяют для отделки фасонных деталей, прутков и труб, для доводки твердосплавных инструментов, фильер и т.п.

Этот метод обработки обеспечивает высокую производительность и качество обработанной поверхности.

Полирование – процесс абразивной обработки деталей для придания им высокой отражательной способности (зеркального блеска). Применяется для декоративной отделки, а также для подготовки деталей вооружения перед нанесением защитных (от коррозии) покрытий (хромирование, никелирование, анодирование и т.п.). У артиллерийских орудий полируют

контрольные площадки, рукоятки маховиков и др. Погрешности формы и размеров при этом не исправляются.

Полирование заключается в обработке поверхности эластичным инструментом (из войлока, фетра, резины, кожи), покрытым абразивным материалом. В качестве полирующего материала применяют шлиф порошки зернистостью 8, 6, 5, 3; микропорошки М14, М10, М7, а также мел, оксид хрома, пемзу, венскую известь и др. Полирующие материалы входят в состав паст, в которых используются связующие вещества: воск, стеарин, парафин, керосин, масла и т.п. Наиболее широко при ремонте вооружения применяется паста ГОИ (разработана Государственным оптическим институтом) трех сортов: грубая (темно-зеленого, почти черного цвета); средняя (темно-зеленого цвета) и тонкая (светло-зеленого цвета). После обработки тонкой пастой поверхности приобретают зеркальный блеск.

Полирование производится на станках простейшей конструкции (по типу заточных). Инструмент для полирования можно закрепить в патроне токарного или сверлильного станка. Обрабатываемую деталь устанавливают в приспособление или удерживают в руках. Рекомендуемые значения скоростей обработки: 30 - 35 м/с для сталей и чугунов, 18–25 м/с для цветных сплавов.

Хонингование - процесс обработки мелкозернистыми абразивными брусками предварительно расточенного или развернутого отверстия. От внутреннего шлифования он отличается конструкцией инструмента и траекторией его движения относительно обработанной поверхности. Режущий инструмент – *хон* представляет собой устройство, несущее абразивные бруски (рисунок 5.30, а). Он совершает вращательное и возвратно-поступательное движения, так что каждое абразивное зерно брусков образует на обрабатываемой поверхности риску по винтовой линии (правого направления при движении хона вверх и левого – при движении вниз). Высокое качество обработки обеспечивается несовпадением собственной траектории каждого режущего зерна.

Хонингование один из немногих процессов, устраняющих погрешность формы отверстия (овальность, некруглость и т.п.). Этим способом обрабатывают каналы орудийных стволов, ПОУ, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, гидросистем и другие точные отверстия. При этом достигаются значительно более высокая производительность и качество обработки, чем при внутреннем шлифовании.

Окружная скорость хона $V_o=20-75$ м/мин, поступательная – $V_n=5-20$ м/мин. Припуск на хонингование оставляют 0,02–0,2 мм. Для обработки стальных деталей применяют алмазные или абразивные (22А–26А) брусочки, для чугунных – алмазные или из карбида кремния зеленого (62С–64С); связка бакелитовая; зернистость 6–4 для предварительного и М28–М20 для окончательного хонингования.

Суперфиниш – процесс сверхтонкой отделки наружных (реже внутренних) поверхностей мелкозернистыми абразивными или алмазными брусками, укрепленными в специальной головке. Отличительными особенностями этого процесса являются: весьма малое давление режущего инструмента на поверхность детали (0,05–2,5 кг/см²); небольшая скорость резания; сложность траектории движения режущих зерен по поверхности обработки. Такие условия резания обеспечивают исключительно низкую шероховатость поверхности, не исправляя погрешности формы. Припуск на суперфиниширование не оставляют, так как снимаемый слой настолько мал, что размер детали не выходит из поля допуска предшествующей операции.

Заготовка совершает (рисунок 5.30, б) вращательное движение со скоростью $V=2,5-10$ м/мин, брусочки – быстрое осциллирующее движение с амплитудой $h=2-6$ мм и частотой 200–1000 Гц, а также медленное поступательное движение подачи S вдоль детали. Такое сложное движение брусочков обеспечивает несовпадение собственных траекторий режущих абразивных зерен. Процесс ведется с обильным поливом СОЖ (смесь керосина с маслом).

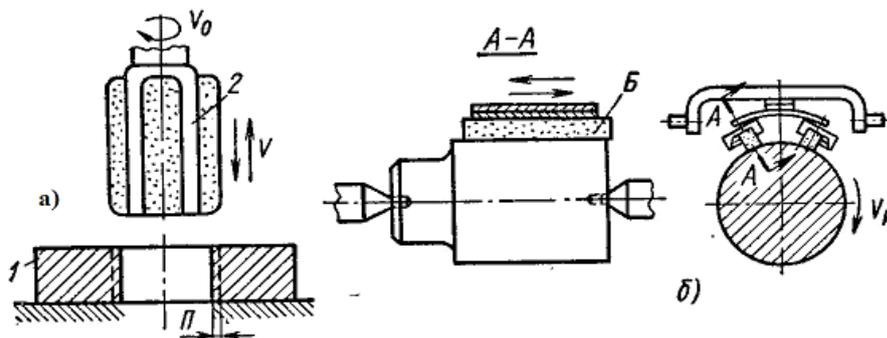


Рисунок 5.30 – Хонингование (а) и суперфиниш (б)

Бруски – из электрокорунда, связка бакелитовая или особая, зернистость М20 – М14, твердость М1 – М3 для закаленной и М3 – СМ2 для незакаленной стали.

Суперфиниширование применяют при обработке беговых дорожек шариковых и роликовых подшипников, шеек коленвалов, поршневых пальцев, деталей металлорежущих станков, измерительного инструмента и др.

Притиркой называется обработка поверхностей деталей посредством очень мелких зерен абразивного материала или паст, при которой снимается тончайший слой металла – до 0,02 мм.

Целью притирки является получение плотного, или герметичного, разъемного и подвижного соединений. Притирке подвергают клапаны, краны, золотники и другие детали. Точность притирки обычно составляет от 0,001 до 0,002 мм.

Притирку выполняют специальным инструментом – *притиром*, форма которого должна соответствовать форме притираемой поверхности. По форме притиры делятся на плоские, цилиндрические, резьбовые и специальные.

Плоские притиры представляют собой чугунные плиты, на которых доводят плоскости. Цилиндрические притиры применяются для притирки цилиндрических отверстий. Специальные притиры применяют для притирки поверхностей различной формы.

Арматура, пробки к корпусам кранов, клапаны к седлам специальных притиров не требуют. Сопрягаемые детали притирают одну к другой.

Для производительной и точной притирки необходимо правильно выбирать и строго дозировать количество абразивных материалов, а также смазки.

Обрабатываемые поверхности смазывают маслом или другой жидкостью и посыпают шлиф порошком, затем приводят эти поверхности в соприкосновение и начинают перемещать одну по другой с легким нажимом.

Для проверки плотности прилегания обработанных поверхностей их вытирают досуха, и на поверхности одной из них проводят мелом продольную черту. После этого снова приводят в соприкосновение обе поверхности и поворачивают вправо и влево ту деталь, на которой нанесена меловая черта. Если мел окажется стертым равномерно по всей длине, это означает, что поверхности притерты достаточно плотно, если же меловая черта будет стерта только в отдельных местах, это значит, что детали прилегают еще недостаточно плотно и притирку необходимо продолжить.

Для окончательной доводки вместо порошков применяют пасту ГОИ.

Правильно и хорошо обработанные поверхности после притирки имеют ровную блестящую или матовую поверхность.

Если сравнить полученную шероховатость поверхности в процессе отделочной обработки разными способами, то получим следующие данные: шлифование $R_z = 0,9-5,0$; хонингование $R_z = 0,13-1,25$; притирка $R_z = 0,08-0,25$ и суперфиниширование $R_z = 0,01-0,25$ мкм.

ТЕМА 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ.

В самолетостроении возникает ряд технологических проблем, связанных с обработкой новых материалов или с изготовлением изделий, форму и состояние поверхности которых трудно или невозможно получить традиционными механическими способами обработки. К таким проблемам относятся обработка особо прочных, очень вязких, твердых и хрупких материалов (твердых сплавов, германия, кремния, алмаза, кварца, керамики и многих других). Можно назвать еще ряд технологических проблем, таких как обработка тонкостенных нежестких деталей; пазов и отверстий, имеющих размеры в несколько микрометров; поверхностей с малой шероховатостью, с малой толщиной дефектного поверхностного слоя; изделий из сверхтонкой ленты; удаление деформированного слоя, снятие заусенцев.

Перечисленные и ряд других технологических задач могут быть разрешены применением электрофизических (ЭФО) и электрохимических (ЭХО) методов обработки. Для осуществления размерной обработки ЭФО и ЭХО методами используют электрические, звуковые ударно-импульсные воздействия и различные виды лучевой энергии.

Эти методы обработки успешно дополняют обработку резанием, а в отдельных случаях имеют преимущества перед ней.

Сущность обработки указанными методами заключается в протекании на поверхности обрабатываемых деталей тех или иных эрозионных процессов.

Эрозия металлов - постепенное послойное разрушение поверхности металла под влиянием:

- механических воздействий (истирание, выкрашивание);
- химического или электрохимического растворения;
- выбросов частиц металла под действием электрических зарядов (электроэрозия);
- локального испарения материала под действием лучевой энергии (пучка электронов или луча лазера);
- кавитации.

Очень важно, что при этом механические характеристики обрабатываемого материала (прочность, твердость, вязкость и другие) не оказывают существенного влияния на скорость, качество обработки, износ инструмента, поскольку механические нагрузки на инструмент и заготовку либо отсутствуют благодаря зазору между деталью и инструментом, либо уменьшаются до величин, практически не влияющих на состояние поверхности и точность обработки.

Большинство ЭФО и ЭХО методов позволяет не только изменять форму обрабатываемой детали, но одновременно влияет и на состояние поверхностного слоя, например, снимает наклеп, разрушенный предыдущей обработкой поверхностный слой, удаляет прижоги и другие дефекты. При этом повышаются износостойкость, коррозионная стойкость, прочностные и другие эксплуатационные характеристики.

Рассмотрим основные, наиболее применяемые и перспективные методы обработки: электроконтактную, электроэрозионную, анодно-механическую, электрохимическую, электронно-лучевую и лазерную.

Кроме указанных методов нашли применение и другие, такие как химические, импульсно-механические, плазменные, взрывные и некоторые другие. Часто применяют комбинированные методы, дающие больший эффект, чем каждый из них в отдельности.

6.1 Электрофизические методы обработки материалов

Электроконтактная обработка (ЭКО) основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта ее с инструментом-электродом и удалении размягченного или даже расплавленного металла из зоны обработки механическим способом за счет относительного перемещения электродов.

Основными параметрами ЭКО являются напряжение на электродах и давление между электродами. В зависимости от значения этих параметров можно выделить два основных варианта ЭКО.

а) При низких напряжениях (6–12 В) и малых давлениях (до 1 кг/см^2 , при повышении давления появляются деформации поверхностного слоя) съем металла осуществляется за счет нагрева сопротивлением, так как дуговые разряды при разрыве перемычек не возникают.

б) При повышенных напряжениях (20–40 В) металл удаляется дугowymi разрядами; давление между электродами практически отсутствует и процесс приближается к электродуговому оплавлению.

В зависимости от вида инструмента (диск, резец, сверло, проволочная щетка и др.), характера относительного движения инструмента и детали, среды, в которой протекает процесс (воздух, режущая вода или масло), рода используемого тока (переменный, режущий постоянный) ЭКО имеет много разновидностей.

Рассмотрим наиболее характерную схему обработки диском, работающим периферией (рисунок 6.1).

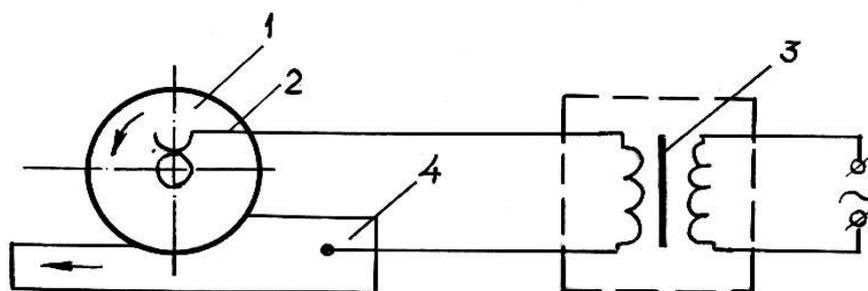


Рисунок 6.1 – Схема ЭКО диском

К электроду-инструменту 1 через токосъемник 2 от понижающего трансформатора 3 подводится переменный ток промышленной частоты напряжением от 6 до 40 вольт. Другим электродом является обрабатываемая заготовка 4, получающая движение подачи. Сила тока может достигать 5000–8000 А.

В качестве материала *инструмента* применяют *чугун* или *медь*. Производительность процесса определяется окружной скоростью диска, поддерживаемой в пределах 50 - 80 м/с. При большей скорости возникает вибрация, при меньшей ухудшается теплоотвод от диска, что приводит к заметному износу инструмента.

Достоинства метода:

- Высокая производительность. Например, при обдирке она достигает $7 \cdot 10^5 \text{ мм}^3 / \text{мин}$.
- Низкий расход электроэнергии. ЭКО является самым энергетически эффективным из группы электроэрозионных. Так, удельный расход энергии

в $\text{кВт} \cdot \text{ч/кг}$ составляет для ЭКО – 0,8–1,0; электроискрового – 12–14; анодно-механического – 5–10; электрохимического – 10–20.

Недостатки:

- Высокая шероховатость и низкая точность обработанной поверхности (при максимальной производительности $R_z = 320$ и грубее). Этот метод является самым грубым из всех эрозионных.
- Возможность образования дефектного поверхностного слоя, особенно с увеличением контактных давлений свыше 1 кг/см^2 . В отдельных случаях остаточные напряжения и микротрещины могут достигать глубины 2 - 3 мм.

Исходя из сказанного, можно рекомендовать использовать ЭКО на заготовительных операциях (разрезка проката и слитков), при зачистке отливок (отрезка литников и прибылей), при черновой обработке заготовок из труднообрабатываемых сплавов, для очистки окалины (в этом случае применяют электрод-инструмент в виде проволочной щетки) и т.п.

Разновидностью ЭКО является *электрохимическое точение* (сверление), выполняемое по аналогичной схеме обычными резцами и сверлами. В результате разогрева поверхностного слоя заготовки резко снижаются усилия резания, повышается обрабатываемость, снижается износ режущего инструмента. Чистота обработки достигает $R_z = 5 \text{ мкм}$. Характерной особенностью данного метода является упрочнение поверхностного слоя, что повышает усталостную прочность деталей.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на процессе электроэрозии, открытом в 1943 г Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Сущность процесса электроэрозии заключается в разрушении поверхности электрода (анода) при электрическом пробое межэлектродного промежутка. Пробой может происходить как в газовой среде (воздух), так и в диэлектрической жидкости (керосин, минеральное масло, вода), причем в жидкой среде процесс протекает интенсивнее.

В промышленности применяют три основных вида ЭЭО – электроискровую, электроимпульсную и высокочастотную электроискровую.

При **электроискровой обработке (ЭИО)** используют импульсные искровые разряды между электродами, один из которых обрабатываемая заготовка (анод), а другой инструмент (катод). Используют различные генераторы импульсов: RC , RLC , LC (R – резистор, C – емкость, L – индуктивность), а также ламповые генераторы.

Схема электроискрового станка с генератором импульсов RC (резистор-емкость) показана на рисунке 6.2.

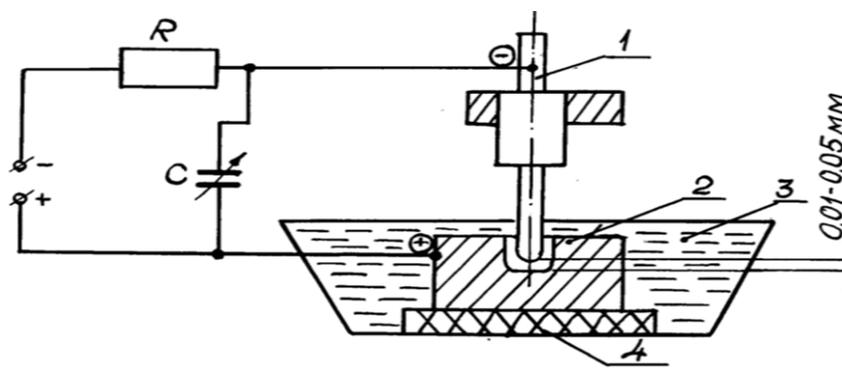


Рисунок 6.2 - Схема электроискровой установки
 1 - инструмент катод; 2 - заготовка анод;
 3 - диэлектрическая жидкость; 4 - изолятор

Работа схемы заключается в следующем. Конденсатор C заряжается через резистор от источника постоянного тока напряжением 100 - 200 В. При достижении на подключенных параллельно конденсатору электродах 1 и 2 напряжения, равного пробойному, образуется канал проводимости, через который осуществляется разряд всей энергии, накопленной конденсатором.

Параметры схемы релаксационного генератора существенно влияют на характеристики процесса. При увеличении емкости C запас энергии, накопленный в конденсаторе, увеличивается и, следовательно, увеличивается объем лунки, то есть производительность процесса обработки.

Электроды-инструменты для ЭИО изготавливают из графита, медно-графитовых композиций, меди марок М1 и М2, латуней. Проволочные электроды (для разрезания листового материала и получения отверстий малого диаметра) выполняют из вольфрама или молибдена.

Электроискровым методом целесообразно обрабатывать твердые сплавы, труднообрабатываемые материалы (токопроводящие), тантал, молибден и другие.

Этим методом получают сквозные и глухие отверстия любой формы отверстия с криволинейными осями; вырезают заготовки из листа при использовании проволочного или ленточного инструмента; изготавливают сетки и сита; клеймят детали; выполняют плоское и круглое шлифование и т.п.

Электроимпульсная обработка. В отличие от электроискровой обработки, где используются импульсы средней длительностью (20–200 мкс) здесь применяют импульсы длительностью 500–10000 мкс большой мощности от электромашинных или электронных генераторов. Установлено, что при импульсах большой длительности интенсивнее разрушается катод, поэтому обработку ведут при обратной полярности (то есть "минус" на заготовке). Высокие мощности, реализуемые в импульсах, позволяют резко повысить производительность (до 6000 мм³/ч, что в 10–15 раз больше, чем при электроискровой обработке).

Метод рекомендуется применять при обработке крупногабаритных деталей сложной формы из специальных сталей, твердых и жаропрочных сплавов. Примеры: изготовление пресс-форм для обтекателей диаметром до 1400 мм; штампов высотой до 200 мм; грубая предварительная обработка твердосплавных инструментов, фильер под электрохимическую обработку; извлечение сломанного инструмента, прошивание отверстий в крупногабаритных деталях; изготовление клейм, резьбовых отверстий и т.п.

Инструмент - анод делают из углеграфитных композиций, реже из меди марок М1 и М2. Обработку ведут в соляровом или трансформаторном масле.

Высокочастотная электроэрозионная обработка. В этом случае, напротив, используются импульсы малой мощности и малой длительности (высокой частоты 100 кГц и выше). Импульсы формируются специальным прерывателем, вакуумной лампой или тиратроном.

Основное назначение - высокоточная обработка с исключительно низкой шероховатостью поверхности.

Другие особенности: малые структурные изменения поверхности, высокая стойкость инструмента.

Инструмент делают из меди, латуни ЛС59-1, бронзы БрАЖМц 9-4-4, серого чугуна СЧ 25; в качестве рабочей жидкости применяют керосин, трансформаторное масло, растворы кислот, солей, щелочей, водопроводную воду.

Наиболее широкое применение метод нашел при обработке инструмента и штампов из твердых сплавов вследствие отсутствия структурных изменений и микротрещин в поверхностном слое.

5.2 Электрохимические методы обработки материалов.

Электрохимические методы обработки основаны на законах анодного растворения металла при электролизе. При пропускании постоянного электрического тока через электролит на поверхности заготовки, включенной в электрическую цепь в качестве анода ("плюс" от источника тока), происходят химические реакции и поверхностный слой металла превращается в химическое соединение. Чтобы процесс продолжался, необходимо удалять (эвакуировать) продукты электролиза, иначе они будут образовывать пассивированную пленку на поверхности заготовки, имеющую очень высокое электрическое сопротивление, ток идти не будет и процесс обработки прекратится.

По способу эвакуации продуктов электролиза различают две основные разновидности ЭХО: анодно-механическая (удаление продуктов распада и пассивированной пленки происходит механическим воздействием инструмента) и электрохимическая (продукты растворения переходят в электролит и удаляются струей раствора).

Анодно-механическая обработка (АМО) является сочетанием электротермических и электрохимических процессов и поэтому занимает промежуточное положение между электроконтактной и электрохимической обработкой.

В отличие от ЭХО здесь обработка происходит в жидкой токопроводящей среде – электролите, которым чаще всего является водный раствор жидкого натриевого стекла (силикат натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$).

В отличие от электрохимической обработки удаление продуктов распада и образующейся при электролизе пассивированной силикатной пленки, имеющей весьма большее электросопротивление и высокую механическую прочность, происходит за счет механического воздействия электрода - инструмента.

Рассмотрим принципиальную схему АМО на примере резки заготовки вращающимся диском (рисунок 6.3, а).

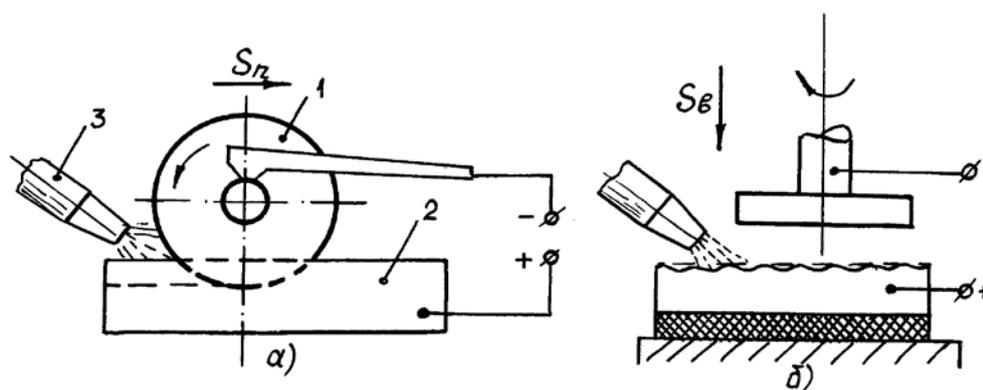


Рисунок 6.3 – Принципиальная схема АМО:
а – резка диском; б – обработка плоской поверхности

Токопроводящий электрод-инструмент 1 соединен с отрицательным полюсом источника тока (катод), совершает главное вращательное движение и движение подачи. Электрод-изделие 2 соединен с положительным полюсом источника тока (анод). В зону обработки поливом из сопла 3 непрерывно подается электролит, увлекаемый инструментом в межэлектродный промежуток. Отходы удаляются из зоны обработки вращающимся инструментом.

Рассмотрим типовые схемы анодно-механической обработки.

Анодно-механическая резка и обдирка. Сущность этого вида обработки была рассмотрена выше (см. рисунок 6.3). По сравнению с обработкой известными механическими

способами производительность повышается в несколько раз и одновременно улучшаются другие технико-экономические показатели: снижается брак при разрезке хрупких материалов, уменьшаются потери материалов; используется более простой и дешевый инструмент; уменьшается зона структурных изменений в окрестностях реза, что улучшает качество изделия и позволяет уменьшить величину припуска. Наша промышленность выпускает специальные анодно-механические станки для заготовительных операций.

Анодно-механическое обтачивание, шлифование, полирование. Эти виды обработки позволяют производить фасонную обработку тел вращения (рисунок 6.4, а), чистовую обработку и доводку (рисунок 6.4, б). Создание необходимого парка оборудования происходит за счет модернизации обычных шлифовальных, токарных и сверлильных станков.

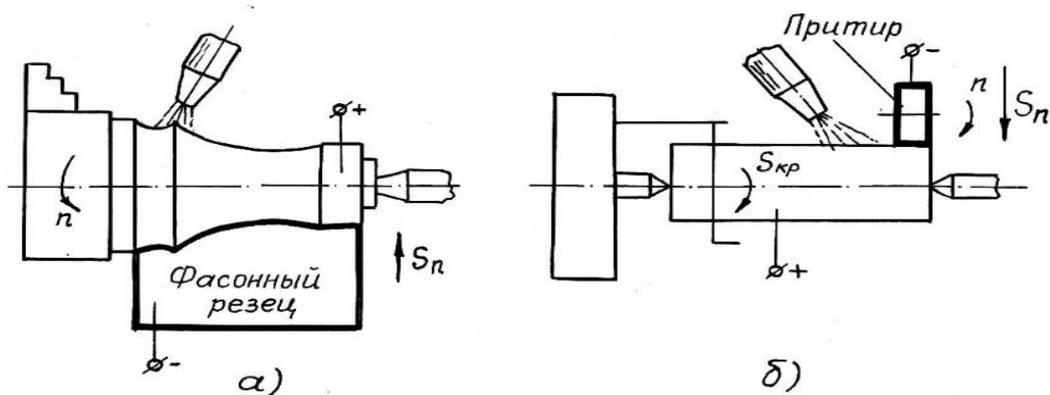


Рисунок 6.4 – Анодно-механическое обтачивание (а); притирка, доводка (б)

Электрохонингование. Это один из наиболее распространенных процессов на артиллерийских и оружейных заводах для обработки каналов стволов, цилиндров ПОУ и других внутренних поверхностей (в частности цилиндров ДВС). Электрохонингование может производиться на обычных хонинговальных или сверлильных станках, оснащенных зажимным приспособлением для детали, погруженной в резервуар, наполненный электролитом. Кроме того, станок оборудуется электроприводом и источником постоянного или переменного тока.

В случае работы на переменном токе (хотя при этом производительность уменьшается) в качестве источника питания можно использовать сварочный трансформатор типа СТЭ.

Типовая схема электрохонингования (ЭХ) показана на рисунке 6.5.

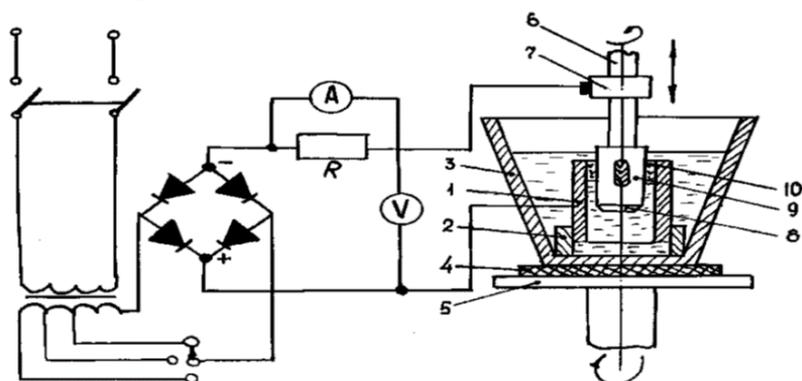


Рисунок 6.5 – Схема электрохонингования

Деталь 1, являющаяся анодом, крепится в приспособлении 2, установленном в баке из нержавеющей стали 3, который изолируется от станины станка текстолитовой прокладкой 4. Приспособление установлено на вращающийся стол станка 5 или вращается специальным механизмом. Катодом является штанга 6 хонинговальной головки, токоподвод к которой осуществляется через контактные кольца 7 на шпинделе. Для избежания случайных замыканий на торце хонинговальной головки укреплен изоляционный колпачок 8. Замыкание между корпусом головки 9 и деталью предотвращается за счет заданного радиального зазора, который должен быть не менее 1 мм.

Во время обработки головка совершает вращательное ($n = 250 \text{ об/мин}$) и возвратно-поступательное ($50\text{--}70 \text{ дв. ход. /мин}$) движение. Давление брусков (из липы, ольхи или пластмассы), снимающих анодную пленку регулируется в пределах $1\text{--}3 \text{ кг/см}^2$. Первая стадия обработки происходит в электролите из растворенного в отношении 100 г/л NaNO_3 , в который добавляется абразивный порошок М28 в количестве 100 г/л. Деталь вращается со скоростью 16 об/мин; напряжение 6–12 В, плотность тока 0,1–0,5 А/см². Шероховатость обработки достигает 1,25–0,8 мкм при съеме металла на сторону 0,03–0,04 мм.

Для окончательной обработки (вторая стадия) применяют тот же электролит с добавлением в качестве абразива окиси хрома Cr_2O_3 . Режимы те же. После 20-минутного окончательного хонингования ток выключают и обрабатывают без действия тока в течение 3–5 минут для полного снятия анодной пленки.

Съем металла на сторону при окончательной обработке 0,005–0,008 мм при шероховатости $Rz = 0,16\text{--}0,1 \text{ мкм}$ (поверхность имеет зеркальный блеск).

Достоинства ЭХ по сравнению с обычным хонингованием:

- а) выше чистота поверхности (при обычной доводке $Rz = 1,25\text{--}0,4 \text{ мкм}$);
- б) ЭХ может быть применено к деталям из металлов с любыми механическими свойствами (механическое хонингование неэффективно при обработке вязких материалов);
- в) производительность при ЭХ повышается в 4–5 раз в сравнении с механическим хонингованием.

Электроабразивная и электроалмазная обработка отличается от описанных выше тем, что инструментом-электродом является шлифовальный круг, выполненный из абразива (в том числе алмаза) на электропроводной основе. Такой основой может быть бакелитовая связка с графитовым наполнителем. Применяется также пропитка абразивных кругов свинцом.

Инструментом служит токопроводящий круг формы ЧЦ или ПВ с частицами абразива 2 из электрокорунда (размер зерна 60 – 80 мкм). Как видно из схемы, частицы абразива являются изолирующей прокладкой между анодом-деталью 1 и катодом-инструментом 3.

Оптимальным условием процесса является поддержание зазора, при котором плотность тока будет наибольшая, а условия возникновения короткого замыкания еще не наступают. Этот зазор обеспечивается выступающими из связки абразивными частицами.

Высокая интенсивность анодного растворения обеспечивается высокой плотностью тока, которая определяется размером межэлектродного промежутка (0,025 – 0,03 мм). Производительность при предварительной обработке достигает 20 – 30 мм³/мин, при этом 85 – 90% металла снимается за счет анодного растворения и 15 – 10% за счет механического действия абразива. Окружная скорость круга выбирается в пределах 8 – 20 м/с. Электрические режимы зависят от вида обработки. При предварительной обработке: напряжение 20 – 25 В и сила тока 20 – 30 А; при окончательной – снижаются до 10 – 15 В и 12 – 15 А. Шероховатость достигает 0,63 – 0,4 мкм. Припуски на электроабразивную обработку выбирают в пределах 0,05 – 0,5 мм.

Электроалмазная обработка производится по той же схеме, но с применением электропроводных кругов с тонким слоем (до 3 мм) алмазной крошки зернистостью А8 – А10.

Благодаря более мелкому зерну плотность тока выше ($60 - 100 \text{ A/cm}^2$), что резко повышает производительность. Напряжение низкое ($5 - 15 \text{ В}$), что исключает возникновение эрозионных процессов. Износ алмазных кругов значительно ниже, стойкость круга достигает $10000 - 12000 \text{ ч}$. Шероховатость поверхности достигает $0,32 - 0,2 \text{ мкм}$.

Электрохимическая обработка (ЭХО) основана на законах анодного растворения при электролизе, т.е. этот процесс можно рассматривать как обратный гальваническому осаждению при нанесении гальванопокровтий.

Можно выделить две разновидности ЭХО:

- электрохимическое полирование (условно говоря "безразмерная обработка", когда ставится цель только сгладить микронеровности поверхности);
- электрохимическая размерная обработка (получение деталей с заданными формой и размерами).

Электрохимическое полирование. Обработку выполняют в ванне, заполненной электролитом. В зависимости от обрабатываемого материала электролитом служат растворы солей, кислот или щелочей. Обрабатываемую заготовку подключают к аноду, электродом-катодом служит пластина из меди, свинца, стали. Для большей интенсивности процесса электролит подогревают до температуры $40 - 80^\circ \text{C}$.

При подаче напряжения на электроды начинается процесс растворения анода. Растворение происходит главным образом на выступах микронеровностей вследствие более высокой плотности тока на их вершинах. Кроме того, впадины между выступами заполняются продуктами растворения - оксидами и солями, имеющими пониженную проводимость. В результате избирательного растворения микронеровности сглаживаются и обрабатываемая поверхность приобретает зеркальный блеск.

Существенной особенностью электрополированных поверхностей является то, что они не имеют деформированного и разрушенного слоя, наклепа и термических изменений. Существенно уменьшается величина коэффициента трения (в $2-2,5$ раза) за счет изменения микрорельефа поверхности, что связано с уменьшением высоты микронеровностей с соответственным увеличением контактной площади.

Электрохимическая размерная обработка основана на принципе локального анодного растворения при больших (до сотен A/cm^2) плотностях тока. Образовавшиеся при электролизе продукты анодного растворения удаляются с обрабатываемой поверхности и эвакуируются из рабочей зоны потоком электролита, прокачиваемого с высокой скоростью (до 50 м/с) через малый ($0,02 - 0,5 \text{ мм}$) межэлектродный зазор. В качестве электролитов используют водные растворы неорганических солей (NaCl , NaNO_3 и др.), реже кислот и щелочей. Участки, не нуждающиеся в обработке, изолируются, а катоду-инструменту придается форма, зеркально отображающая получаемую поверхность (рисунок 6.6). Таким образом, формообразование поверхности происходит по методу копирования, причем износ инструмента полностью отсутствует, так как таковым является струя электролита.

Сущность процессов, протекающих при ЭХО рассмотрим на примере реакции растворения анода, состоящего из сплава на основе железа в электролите $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$.

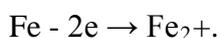
Хлористый натрий в водном растворе диссоциирует на катионы натрия и анионы хлора



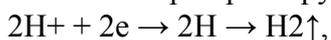
Диссоциирует и вода



Анионы Cl^- перемещаются к аноду и взаимодействуют с железом, отдавая электроны



На катоде катионы натрия реагируют с водой



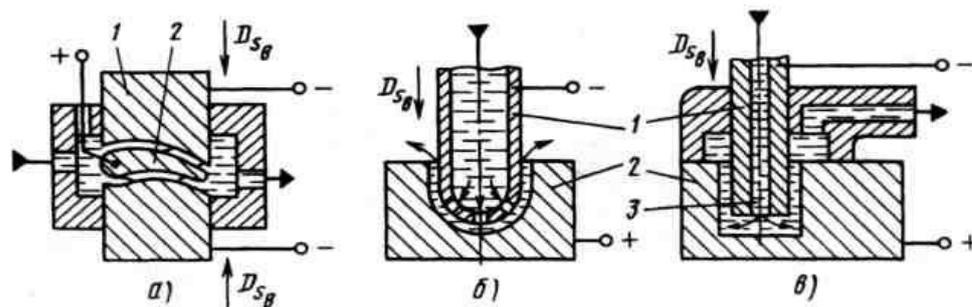
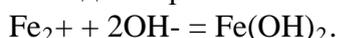


Рисунок 6.6 - Схемы электрохимической размерной обработки:
1 - инструмент-катод; 2 - заготовка-анод, 3 - изолятор

при этом выделяется свободный водород (что требует наличия вытяжки при ведении процесса в открытых ваннах).

Источник тока отсасывает избыточные электроны с анода и переносит их на катод. Образовавшееся на аноде хлористое железо гидролизуеться



Получившийся гидрат закиси железа под действием растворенного в электролите кислорода переходит в гидрат окиси железа



который выпадает в осадок.

При неподвижном электролите эти продукты растворения скапливаются на поверхности детали и процесс постепенно прекращается. Для осуществления производительного и непрерывного процесса обработки необходимо не только поддерживать требуемую концентрацию и чистоту электролита, но и удалять нерастворимые продукты растворения. Это обеспечивается оптимальной скоростью циркуляции электролита $V_{\text{э}}$ в межэлектродном промежутке.

Основными элементами установки для ЭХО являются: понижающий трансформатор, выпрямитель, контрольные приборы и сигнальная лампа, индуцирующая момент короткого замыкания электродов. Кроме того, в состав установки входят система автоматического регулирования межэлектродного зазора и других характеристик протекания процесса, а также гидроагрегат (насосы для электролита и охлаждающей жидкости, система регенерации электролита - фильтры, отстойники, центрифуги и пр.).

Применяемые источники тока (машинные генераторы, выпрямители и т.д.) должны иметь напряжение 6 - 20 В и обеспечивать плотность тока 60 - 200 А/см².

Инструмент для размерной ЭХО изготавливают из сплавов свинца с сурьмой, меди, латуни, олова, чугуна, нержавеющей стали, графита, меднографитовых композиций и т.д.

Изоляцию катода в тех местах, где не должна проходить обработка, осуществляют резиной, эбонитом, капроном, винипластом, эпоксидными смолами, керамическими эмалями, оргстеклами, фторопластовыми эмульсиями и другими электроизоляционными материалами.

5.3 Лучевые методы обработки

Основой лучевых методов обработки является удаление материала с поверхности заготовки за счет нагрева и испарения материала с узлокального участка сфокусированным лучом высокой плотности энергии (электронным или лучом лазера).

Для этих методов характерна практическая независимость обрабатываемости от физико-химических свойств, поэтому как металлы и их сплавы, так и неметаллические материалы (керамика, ферриты, твердые сплавы, корунд, рубин, алмаз и т.д.) обрабатываются одинаково успешно.

Возможность точного дозирования энергии луча позволяет осуществлять широкий круг технологических процессов: местную термообработку, зонную очистку, нанесение покрытий, сварку, механическую обработку. В ряде случаев (например, для отверстий диаметром от 1 до 10 *мкм*) лучевая обработка является единственно возможной. При этом, поскольку инструментом служит сфокусированный луч, вопрос об износе инструмента и связанных с этим погрешностях обработки, полностью снимается.

Основными методами лучевой обработки являются электронно-лучевая и светолучевая (лазерная).

Электронно-лучевая обработка (ЭЛО) основана на расплавлении и испарении при резком торможении потока электронов в месте встречи его с обрабатываемой поверхностью. Для получения мощного потока электронов электронный пучок, эмитируемый вольфрамовым катодом в электронной пушке (рисунок 6.7), ускоряется напряжением, приложенным между катодом и анодом, юстируется и фокусируется при помощи магнитных линз. Стилгматор придает лучу круглую форму, а перемещение луча по поверхности изделия осуществляется отклоняющей системой. Изделие, закрепленное на координатном столике, также может перемещаться относительно луча. Все устройство находится в вакуумной камере.

Локальная обработка непрерывным потоком электронов невозможна, поскольку приводит к перегреву области обработки и возникновению широкой зоны оплавления. Требуемое распределение температур достигается чередованием мощных импульсов с паузами, во время которых происходит отвод тепла.

В зоне обработки температура достигает 6000°C , а на расстоянии 1 *мкм* от кромки луча не превышает 300°C . Продолжительность импульсов и интервалы между ними подбирают так, чтобы за один цикл материал успел нагреться и испариться только под лучом. Длительность импульсов составляет 10–4–10–6 с, а частота 50–6000 *Гц*. Диаметр сфокусированного луча - несколько микрометров.

Электронно-лучевой метод наиболее эффективен при обработке отверстий диаметром от 10 *мкм* до 1 *мм*, прорезании пазов, резке заготовок, изготовлении тонких пленок и сеток из фольги. Обрабатывают заготовки из труднообрабатываемых металлов и сплавов, а также из неметаллических материалов: рубина, керамики, кварца, полупроводников и т.п.

Достоинства метода:

1. Возможность регулирования энергетических характеристик луча в широких пределах.
2. Легкость управления лучом при помощи отклоняющей системы.
3. Вакуумная среда позволяет обрабатывать активные легкоокисляющиеся материалы.

Главный *недостаток* – обработка возможна только в вакууме.

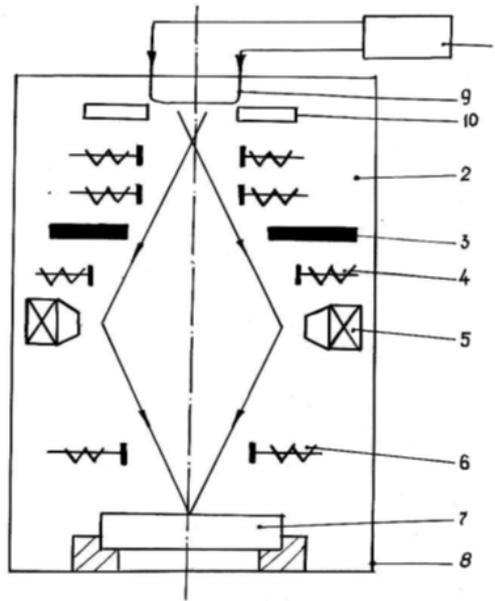


Рисунок 6.7 - Схема электронно-лучевой установки:

1 - источник напряжения; 2 - магнитная юстировка; 3 - диафрагма; 4 - стигматор; 5 - магнитная линза; 6 - отклоняющая система; 7 изделие; 8 - вакуумная камера; 9 - катод; 10 - анод

Светолучевая (лазерная) обработка основана на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность обрабатываемой заготовки. Источником излучения служит лазер - оптический квантовый генератор (ОКГ).

Лазерный луч - это направленный поток электромагнитных волн только одной длины, то есть монохроматического света (видимого или невидимого), который с помощью оптических элементов (линз, зеркал, призм и т.д.) можно сделать остросфокусированным и направить в любое труднодоступное место. Если луч лазера сфокусировать до очень малых размеров - сотых долей миллиметра, то плотность энергии достигнет миллионов ватт на квадратный сантиметр, а температура в месте его действия - десятки тысяч градусов. Этого достаточно не только для расплавления, но и испарения любых материалов.

Из всех известных типов ОКГ (твердотельных, газовых, полупроводниковых) в технологии нашли наибольшее применение твердотельные лазеры на кристалле рубина (окиси алюминия, активированной 0,05% хрома), дающие выходную энергию излучения до 20–40 Дж или на стеклянных стержнях, активированных неодимом (энергия до 100–120 Дж).

Схема ОКГ, рабочим элементом которого является рубиновый стержень, показана на рисунке 6.8.

Работа лазера основана на принципе стимулированного генерирования светового излучения. Атом активного вещества, имея определенный запас энергии, находится в устойчивом энергетическом состоянии и располагается на определенном энергетическом уровне. Для выведения атома из устойчивого энергетического состояния его необходимо возбудить. Возбуждение ("накачку") активного вещества осуществляют импульсной лампой. Возбужденный атом, получив дополнительный фотон от системы накачки, излучает сразу два фотона, в результате чего происходит своеобразная цепная реакция (генерация лазерного излучения).

Мощность упорядоченного излучения увеличивается путем многократного внутреннего отражения от зеркальных поверхностей рубинового стержня (полупрозрачного и непрозрачного диэлектрических покрытий, нанесенных на торцах кристалла).

Все элементы ОКГ помещены в корпусе, внутренняя поверхность которого является рефлектором, собирающим свет лампы на рубине. Для получения необходимой плотности

энергии излучения луч фокусируется через систему линз в зоне обработки, наблюдение за которой осуществляется через микроскоп (на рисунке 6.8 не показан).

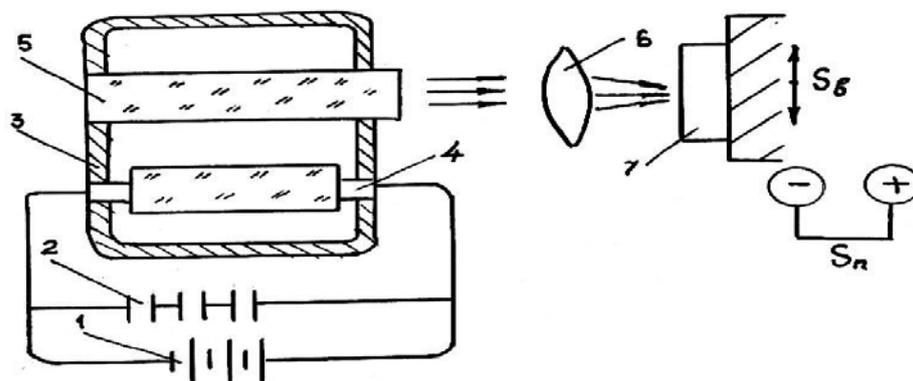


Рисунок 6.8 – Схема оптического квантового генератора:
1 – источник тока; 2 – батарея конденсаторов; 3 – корпус; 4 – импульсная лампа; 5 – рубин; 6 – линзы; 7 – заготовка

Питание импульсной лампы осуществляется от батареи конденсаторов, заряжаемой высоковольтной выпрямительной схемой. Интервалы между вспышками составляют 15–30 с. Длительность импульса равна 1–5 мс. Наведение на месте обработки и фокусировка осуществляются при помощи луча света от осветителя (на рисунке не показан), проходящего через кристалл рубина и оптическую систему, имитирующую излучения ОКГ.

После наведения и фокусировки луча производится "поджиг", в результате которого электрическая энергия, запасенная в батарее конденсаторов, преобразуется в световую энергию импульсной лампы, переводящей атомы хрома в возбужденное состояние, из которого они возвращаются в нормальное, излучая фотоны с длиной волны 0,6943 мкм (красная флюоресценция рубина).

Взаимодействие фотонов с возбужденными атомами дает лавинообразные потоки фотонов в самых различных направлениях, однако наличие зеркал-резонаторов приводит к тому, что при многократном отражении происходит усиление свободных колебаний только в направлении оси стержня рубина. Вся запасенная энергия в стержне одновременно высвобождается, и кристалл испускает ослепительно яркий красный свет. Расходимость луча обычно не превышает $0,10^0$.

Энергия светового импульса ОКГ обычно невелика (до 100 - 120 Дж), но она выделяется в миллионные доли секунды и сосредоточена в луче диаметром около 0,01 мм. В фокусе диаметр светового луча составляет всего несколько микрон, что обеспечивает температуру 6000 – 8000⁰ С. Этого достаточно для плавления и испарения всех известных материалов.

Достоинства метода:

1. Для обработки не требуется создания вакуума, что значительно усложняет процесс.
2. Нет рентгеновского излучения, сопутствующего обработке электронным лучом.
3. Лазерные установки конструктивно проще электронных пушек.

Главный недостаток – трудность управления движением луча по обрабатываемой поверхности, поэтому при обработке перемещается сама заготовка.

Лазерную обработку применяют при прошивании сквозных и глухих отверстий в любых материалах независимо от их природы и механических характеристик, разрезке заготовок на части, вырезке заготовок, прорезании пазов. Например, обработка рубиновых камней для часовой промышленности; отверстий любой формы для фильеров (волокон) из алмаза, корунда, твердого сплава диаметром от 0,003 до 1 мм; диафрагм для электронно-лучевой

обработки; деталей топливной аппаратуры дизелей; сит; вольфрамовой, танталовой, молибденовой или медной фольги; контурная обработка по аналогии с фрезерованием и т.п.

Перемещения заготовки относительно луча управляют системы ЧПУ, что позволяет обрабатывать по контуру детали самой сложной геометрической формы с высокой точностью и качеством.

6.4 Ультразвуковая обработка

Ультразвуковая обработка (УЗО) материалов – разновидность механической обработки – основана на разрушении обрабатываемого материала абразивными зёрнами под ударами инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой. Источником энергии служат ультразвуковые генераторы тока с частотой 16 – 30 кГц. Инструмент получает колебания от ультразвукового преобразователя с сердечником из магнитострикционного материала. Эффектом магнитострикции обладают никель, железоникелевые сплавы (пермендюр), железоалюминиевые сплавы (альсифер), ферриты.

В сердечнике из магнитострикционного материала при наличии электромагнитного поля домены разворачиваются в направлении магнитных силовых линий, что вызывает изменение размера поперечного сечения сердечника и его длину. В переменном магнитном поле частота изменения длины сердечника равна частоте колебаний тока. При совпадении частоты колебаний тока с собственной частотой колебаний сердечника наступает резонанс и амплитуда колебаний торца сердечника достигает 2–10 мкм. Для увеличения амплитуды колебаний на сердечнике закрепляют резонансный волновод переменного поперечного сечения, что увеличивает амплитуду колебаний до 10–60 мкм. На волноводе закрепляют рабочий инструмент – пуансон. Под пуансоном-инструментом устанавливают заготовку и в зону обработки поливом или под давлением подают абразивную суспензию, состоящую из воды и абразивного материала. Из абразивных материалов используют карбиды бора или кремния и электрокорунд. Наибольшую производительность получают при использовании карбидов бора. Инструмент прижимают к заготовке силой 1–60 Н.

Процесс обработки заключается в том, что инструмент, колеблющийся с ультразвуковой частотой, ударяет по зёрнам абразива, лежащим на обрабатываемой поверхности, которые скалывают частицы материала заготовки (рисунок 6.9).

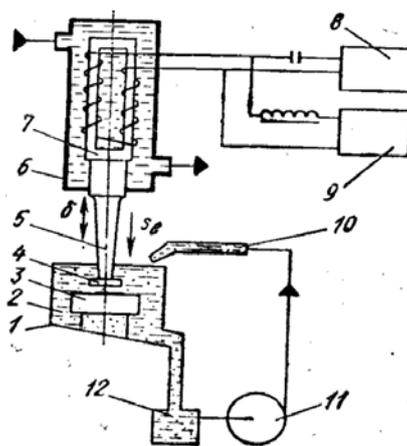


Рисунок 6.9 – Схема ультразвуковой обработки

Заготовку 3 помещают в ванну 1 под инструментом-пуансоном 4. Инструмент установлен на волноводе 5, который закреплен в магнитострикционном сердечнике 7, смонтированном в кожухе 6, сквозь который прокачивают воду для охлаждения сердечника. Для возбуждения колебаний сердечника магнитострикционного преобразователя служит

генератор 8 ультразвуковой частоты и источник постоянного тока 9. Абразивную суспензию 2 подают под давлением по патрубку 10 насосом 11, забирающим суспензию из резервуара 12. Прокачивание суспензии насосом исключает оседание абразивного порошка на дне ванны и обеспечивает подачу абразивного материала в зону обработки. Кавитационные явления в жидкости способствуют интенсивному перемешиванию абразивных зерен под инструментом, замене изношенных зерен новыми, а также разрушению обрабатываемого материала.

Ультразвуковым методом обрабатывают хрупкие твердые материалы: стекло, керамику, ферриты, кремний, кварц, драгоценные минералы, в том числе алмазы, твердые сплавы, титановые сплавы, вольфрам.

Точность размеров и шероховатость поверхностей, обработанных ультразвуковым методом, зависят от зернистости используемых абразивных материалов и соответствуют точности и шероховатости поверхностей, обработанных шлифованием.

Широко применяются также технологии газотермического напыления: плазменное, газоплазменное, детонационное и электродуговое. Используются в промышленности лазерные упрочняющие технологии: лазерная закалка сталей, чугунов, сплавов различных металлов, лазерное легирование поверхностного слоя материалов, газотермическое напыление с последующим оплавлением покрытия лазерным лучом и др.

Список литературы

1. Технология конструкционных материалов: Учебник для вузов/ А.М.Дальский, И.А. Аругюнова, Т.М. Барсукова и др.; Под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2004, 448 с.: ил.
2. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Головин С.А. Физические основы пластической деформации/ Учебное пособие – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.
4. Классификация, обозначение, области применения материалов и покрытий при производстве и ремонте артиллерийского вооружения/Справочное пособие. – Тула: Изд-во ТАИИ, 2004.
5. Справочный материал по курсам "Материаловедение" и "Технология конструкционных материалов". – Тула: Изд-во ТАИИ, 2004.
6. Технические описания и инструкции по эксплуатации станков моделей ИТ-1М, 2Н135, 6Р81, 675П, 7Б35, 3Г71В.
7. Материаловедение: Учебник для вузов/ Б.Н. Арзамасов, В.Н. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 648 с.: ил.
8. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
9. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справ. изд. в 3-х т./ Б.С. Бокштейн, Ю.Г. Векслер, Б.А. Дроздовский и др.; Под общ. ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина, А.В. Супова. Т. 1. Методы испытаний и исследования. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 688 с.: ил.
10. Чернышев Е.А. Литейные сплавы и их зарубежные аналоги: Справочник/ Е.А. Чернышев. – М.: Машиностроение, 2006. – 336 с.: ил.
11. Основы технологии термической обработки стали: Учебное пособие/ И.А. Гончаренко, В.И. Золотухин, А.Е. Гвоздев. Под ред. И.А. Гончаренко. – Тула: «Гриф и К», 2006. – 326 с.
12. Малыгин Ф.К. Материаловедение. Учебник / Ф.К. Малыгин, Н.Е. Стариков, В.М. Павлов, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова. – Тула: Изд-во ТАИИ, 2007. – 320 с.
13. Гвоздев А.Е. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии превращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов.- 2013.- №11.- С. 39-42.
14. Малыгин Ф.К. Материаловедение. Учебник / Ф.К. Малыгин, Н.Е. Стариков, В.М. Павлов, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 232 с. ISBN 978-5-7679-2927-6
15. Сергеев Н.Н. Основы технологической подготовки / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев и др. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 111 с. ISBN 978-5-7679-2950-4