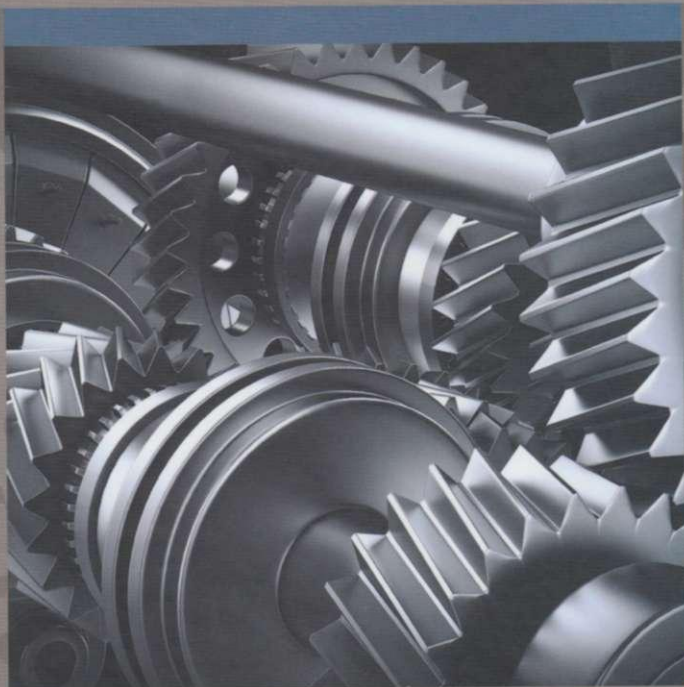


621.7
У-416
ТОП
50

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

Учебник



А. А. Черепакхин



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А. А. ЧЕРЕПАХИН

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНИК

Рекомендовано

Федеральным государственным автономным учреждением

«Федеральный институт развития образования»

в качестве учебника для использования в образовательном процессе образовательных организаций, реализующих программы среднего профессионального образования по специальностям «Мехатроника и мобильная робототехника (по отраслям)», «Монтаж, техническое обслуживание и ремонт промышленного оборудования (по отраслям)», «Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям)», «Контроль работы измерительных приборов» и профессии «Мастер по ремонту и обслуживанию инженерных систем жилищно-коммунального хозяйства»

Регистрационный номер рецензии 205

от 20 июня 2017 г. ФГАУ «ФИРО»

3-е издание, стереотипное



**Москва
Издательский центр «Академия»
2019**

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я723
Ч-467

Рецензенты:

академик Академии транспорта РФ, профессор, д-р техн. наук *В. В. Клеликов*;
зав. отделением «Технические специальности» совхоза-колледжа «Яхромский»
И. В. Крупнова

Черепяхин А. А.

Ч-467 **Материаловедение : учебник для студ. учреждений сред.
проф. образования / А. А. Черепяхин. — 3-е изд., стер. — М. :
Издательский центр «Академия», 2019. — 384 с.
ISBN 978-5-4468-8111-6**

Учебник подготовлен в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальностям укрупненной группы «Машиностроение», в том числе по специальностям из списка ТОП-50. Учебное издание также может быть использовано для реализации программы среднего профессионального образования по специальности «Контроль работы измерительных приборов» и профессии «Мастер по ремонту и обслуживанию инженерных систем жилищно-коммунального хозяйства» (из списка ТОП-50). Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Материаловедение».

Приведены данные о строении и свойствах металлов и сплавов, основы теории сплавов, химико-термической обработки металлов и сплавов. Рассмотрены современные конструкционные и иные материалы, применяемые в машиностроении. Освещены основные способы обработки конструкционных материалов, включая слесарную обработку, классификация ЭНИМС и принципы работы металлообрабатывающих станков. Рассмотрены современные методы и способы обработки поверхностей заготовок, обработки металлов давлением и сварки.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 620.22(075.32)
ББК 30.3я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым
способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-4468-8111-6

© Черепяхин А. А., 2018
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2018
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2018

Уважаемый читатель!

Вы держите в руках учебник, который был подготовлен Издательским центром «Академия» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) в рамках реализации комплексного проекта подготовки кадров по 50 наиболее востребованным на рынке труда, новым и перспективным профессиям и специальностям среднего профессионального образования.

Одной из задач проекта является обновление содержания профессионального образования с учетом профессиональных стандартов, современных методик и технологий. При разработке ФГОС также учитывались требования международных конкурсов профессионального мастерства, включая чемпионаты «Молодые профессионалы» (WorldSkills и WorldSkills Russia).

Издательский центр «Академия» является лидером по выпуску учебных материалов для СПО в Российской Федерации. Более двадцати лет наши издания помогают студентам овладевать знаниями, умениями и навыками по рабочим профессиям и специальностям. Стремясь идти в ногу со временем, издательство предлагает не только печатные издания, но и электронные учебники, электронные учебно-методические комплексы и виртуальные практикумы.

Интерактивная форма подачи информации с учетом последних методик и тенденций в преподавании — отличительная особенность и визитная карточка Издательского центра «Академия» на российском рынке.

Мы надеемся, что данный учебник будет полезен студентам, облегчит задачу преподавателей, а также поможет специалистам, которые стремятся расти и развиваться в выбранной ими области, достичь новых профессиональных вершин.

Предисловие

В курсе «Материаловедение» изучаются закономерности, определяющие строение и свойства материалов в зависимости от их состава и условий обработки, способы переработки материалов, начиная от руды и заканчивая готовым изделием. Рассматриваются применяемые в промышленности наиболее прогрессивные методы формообразования поверхностей деталей машин литьем, обработкой давлением, резанием, поверхностным пластическим деформированием, электрофизическими и электрохимическими методами.

Во многих главах в рамках изучаемой темы даются практические рекомендации, применение которых позволит студентам эффективно использовать в будущем свой труд на производстве.

Изучение курса «Материаловедение» позволяет студенту получить следующие профессиональные компетенции:

- разрабатывать технологический процесс термической и химико-термической обработки металлов на основе информации нормативно-справочной документации;
- обеспечивать технологическую подготовку производства по термической и химико-термической обработке металлов;
- внедрять и сопровождать в производстве технологический процесс термической и химико-термической обработки металлов.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

Для изготовления деталей машин требуются материалы с различными свойствами, способные работать при высоких нагрузках, положительных и отрицательных внешних температурах, зачастую в агрессивных или абразивных средах. Правильный выбор металлов или сплавов при конструировании, выбор оптимальных способов технологической переработки (от заготовительных операций до механической обработки), поведение изделия в разных условиях эксплуатации определяются свойствами выбираемых конструкционных материалов, которые зависят от их природы и внутреннего строения.

Металловедение — наука, устанавливающая связь между составом, структурой и свойствами металлов и сплавов и изучающая закономерности их изменения при физических или химических воздействиях.

Металлы и сплавы принято подразделять на две группы: *черные металлы и сплавы* — железо и сплавы на его основе; *цветные металлы и сплавы* — Be, Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu и др. Кобальт, никель и марганец часто относят к металлам железной группы. Цветные металлы разделяют на легкие (Be, Mg, Al, Ti); легкоплавкие (Zn, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi); тугоплавкие (Ti, Cr, Zn, Nb, Mo, W, V и др.); благородные (Ph, Pd, Ag, Au, Pt и др.); обладающие химической инертностью; урановые; редкоземельные; лантаноиды; щелочно-земельные.

Общим для всех металлов является:

- характерный металлический блеск, хорошая отражательная способность и непрозрачность;
- высокие пластические свойства;
- высокая теплопроводность и электропроводимость;
- зависимость электропроводимости от температуры (с повышением температуры электропроводимость уменьшается, у большинства чистых металлов при температурах, близких к

абсолютному нулю, электросопротивление скачкообразно падает до нуля — сверхпроводимость);

- термоэлектронная эмиссия — способность испускать электроны при нагреве.

Чистые металлы обладают низкой прочностью, поэтому в машиностроении применяются сплавы. Их получают спеканием или сплавлением двух и более металлов или металлов с неметаллами. Наибольшее применение в машиностроении нашли сплавы на основе железа с добавкой углерода (соединения Fe_3C) и легирующих (облагораживающих, улучшающих свойства) компонентов. Широкое распространение черных металлов обусловлено относительной простотой и дешевизной их производства, хорошим сочетанием пластичности, твердости и прочности. Однако растущие требования к прочности, коррозионной устойчивости, уменьшению массы деталей машин приводят к большему распространению цветных сплавов на основе алюминия, титана, магния.

1.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Все металлы и сплавы имеют кристаллическое строение — атомы (ионы) расположены не хаотично, а в определенном порядке. При этом мелкие кристаллы различно ориентированы по отношению друг к другу.

В твердом состоянии металл представляет собой систему из положительно заряженных ионов, «омываемых газом» из свободных коллективизированных электронов. В системе действуют электростатические силы притяжения (металлическая связь). Силы связи в металлах определяются силами притяжения и силами отталкивания между электронами и ионами. Атомы располагаются на таком расстоянии друг от друга, на котором суммарная сила взаимодействия минимальна. Поэтому в металлах атомы располагаются закономерно, в геометрически правильном порядке, соприкасаясь внешними электронными сферами, образуя правильную кристаллическую решетку, соответствующую минимальной энергии взаимодействия. Кристаллическая решетка состоит из воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки расположения ионов в пространстве. Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме, называется *элементарной кристаллической ячейкой*.

Большинство металлов имеют кристаллическую решетку одного из трех типов:

1) объемно-центрированный куб — ОЦК (рис. 1.1, а) — имеют металлы Pb, K, Na, Li, Ti, Zr, W, Ta, Fe_α, Cr и др.;

2) гранецентрированный куб — ГЦК (рис. 1.1, б) — имеют металлы Fe_γ, Sr, Sn, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Cu, Co_α и др.;

3) гексагональная плотно упакованная решетка — ГПУ (рис. 1.1, в) — имеют металлы Mg, Ti_α, Cd, Os, Zn, Co_β и др.

Расстояние между центрами ближайших атомов в элементарной ячейке называется **периодом ячейки**. Он выражается в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-11} \text{ м}$).

На одну элементарную ячейку ОЦК приходится два атома: один в центре, другой — в вершине куба. На одну элементарную ячейку ГЦК приходится четыре атома: один в вершине куба, а три — атомы, находящиеся в середине грани.

Плотность кристаллической решетки характеризуется координационным числом, равным числу атомов, находящихся на одинаковом и наименьшем расстоянии от рассматриваемого атома. В элементарной ячейке ОЦК расстояние между атомами равно $0,5\sqrt{3}a$ (см. рис. 1.1, а, б). На этом расстоянии у атома находятся восемь соседей. Координационное число равно 8 и обозначается К8 (К — кубическая решетка). Плотность упаковки атома (коэффициент компактности ячейки), равная отношению объема, занятого атомами, к объему ячейки, составляет 68 %. Для ГЦК координационное число равно К12; плотность упаковки — 74 %. Для ГПУ в качестве характеристики ячейки принимаются два параметра: сторона

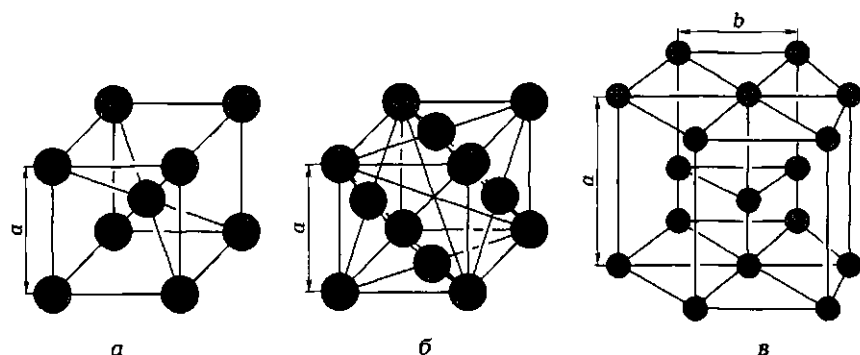


Рис. 1.1. Кристаллические решетки металлов:

а — объемно-центрированный куб; б — гранецентрированный куб; в — гексагональная плотно упакованная решетка; а, б, — характеристики решетки

шестиугольника a и высота призмы b . Координационное число равно $\Gamma 12$ (Γ — гексагональная решетка).

В разных сечениях (плоскостях) кристаллической решетки число атомов неодинаково. Поэтому свойства кристалла (механические, физические и химические) в различных направлениях разные. Это свойство кристаллов называется анизотропией.

1.2. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Реальный кристалл отличается от идеального. Он имеет структурные несовершенства (дефекты): точечные, линейные и поверхностные.

1.2.1. Точечные дефекты

Вокруг узлов решетки (точек равновесия) атомы совершают колебательные движения. Чем выше температура тела, тем больше энергия атомов и больше амплитуда их колебаний. Отдельные атомы реального тела всегда имеют энергию, а следовательно, и амплитуду колебаний выше средней. Эти атомы могут перемещаться между узлами решетки. Допустим, это атом 1 (рис. 1.2, а). Вышедший из узла атом называется дислоцированным. Место, где находился атом 1 (вакансия), не остается свободным, его занимает атом из более глубоких слоев — атом 2. Далее происходит перемещение вакансий в глубь кристалла, в результате решетка искажена.

Источником тепловых вакансий являются свободные поверхности, границы кристаллов, пустоты и трещины. При температурах, близких к температуре плавления, число вакансий может достигать 1 ... 2 % числа атомов в теле. При быстром охлаждении тела их можно зафиксировать (так называемые закалочные вакансии). Вакансии могут образовываться в результате пластической деформации, рекристаллизации и т.д.

1.2.2. Линейные дефекты

Эти дефекты получили название **дислокации**. Их подразделяют на краевые и винтовые.

Сдвинем часть идеального кристалла на одно межатомное расстояние, например влево (рис. 1.2, б). В верхних рядах кри-

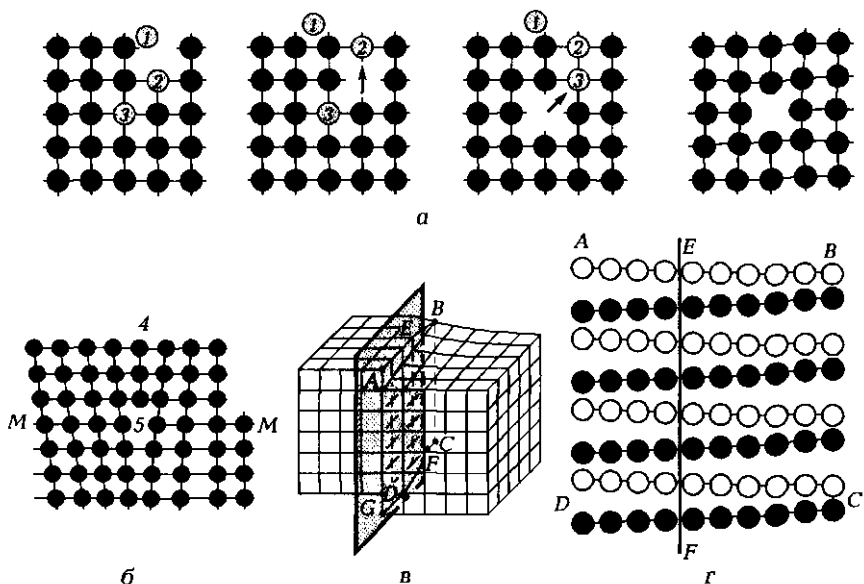


Рис. 1.2. Точечные и линейные дефекты кристаллической решетки металлов:

а — механизм образования точечных дефектов: 1 — дислоцированный атом; 2 и 3 — перемещающиеся атомы; *б* — краевая дислокация: 4—5 — экстраплоскость; *ММ* — плоскость перемещения дислокаций; *в* — пространственная модель образования винтовой дислокации; *г* — расположение атомов в области винтовой дислокации: *G* — плоскость сдвига кристалла; *AB* — сдвинутая часть кристалла; *CD* — несдвинутая часть кристалла; *EF* — винтовая дислокация

сталла оказалось на один атом больше, чем в нижних. Появилась лишняя плоскость 4—5 (экстраплоскость) в верхней части кристалла. Линия, перпендикулярная направлению сдвига кристалла, является краем экстраплоскости. Она называется линейной дислокацией и может достигать многих тысяч межатомных расстояний.

Происхождение винтовой дислокации сложнее. Разрежем кристалл плоскостью *G* (рис. 1.2, *в*) и часть его сдвинем вверх на одно межатомное расстояние. Горизонтальные атомные плоскости изогнутся, и край каждой плоскости сомкнется с краем ближайшей соседней плоскости. Расположение атомов в сдвинутой (*AB*) и в несдвинутой части (*CD*) даст винтовую линию.

На рис. 1.2, *г* белыми кружками обозначены атомы сдвинутой части, черными — несдвинутой. Линия *EF* представляет собой так называемую винтовую дислокацию, при наличии которой кри-

сталл как бы состоит из закрученных по винту кристаллографических плоскостей.

Дислокации легко подвижны, так как в зоне дислокаций решетка упруго искажена, атомы смещены относительно равновесного положения и стремятся вернуться в него.

1.2.3. Поверхностные дефекты

Реальное тело имеет поликристаллическое строение (состоит из множества кристаллов, соприкасающихся между собой). Отдельные кристаллы получили название «зерно». Поверхностные дефекты образуются на границах зерен (рис. 1.3, а), которые обычно представляют собой переходную область шириной 3—4 межатомных расстояний.

В этой области решетка одного кристалла переходит в решетку другого, имеющего иную кристаллографическую ориентацию.

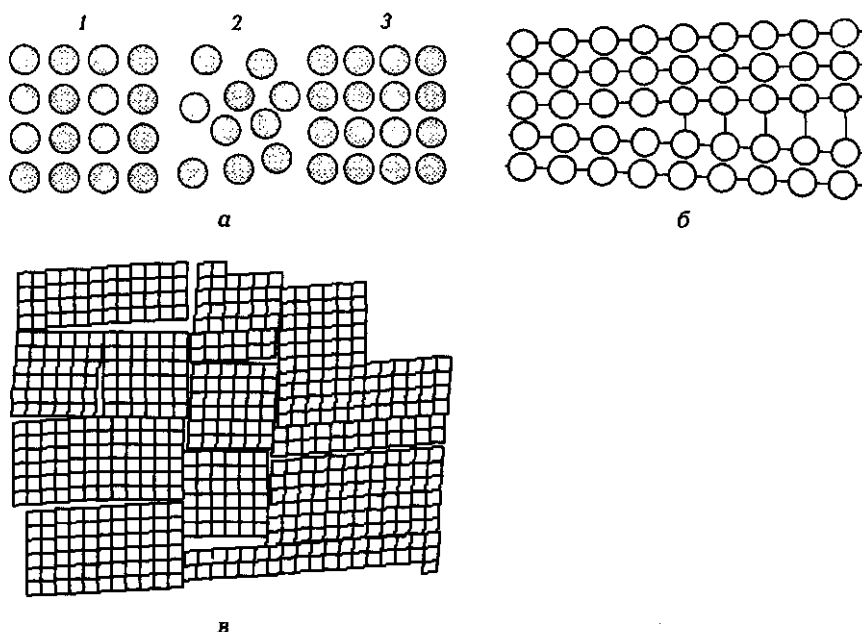


Рис. 1.3. Схемы строения границ и блочной (мозаичной) структуры кристаллов:

а — схема размещения атомов в области границ зерен металла: 1 — зерно 1; 2 — граница; 3 — зерно 2; б — малоугловая граница; в — блочная структура кристалла

Зерна повернуты друг относительно друга на небольшие углы, и по границам скапливаются дислокации (рис. 1.3, б), примеси и различные посторонние включения. Поэтому на границах зерен атомы расположены несколько иначе, чем в объеме зерна. В результате реальный металл имеет сложную дислокационную структуру, называемую мозаичной, или блочной (рис. 1.3, в), которая определяет его свойства. Под влиянием внешних факторов (например, механические нагрузки, тепловое воздействие) меняется количество и плотность дефектов, меняются и свойства металла.

1.2.4. Диффузия

Наличие вакансий определяет возможность перемещения атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие межатомные для данного металла (диффузия). Перемещение атомов, не связанных с изменением концентрации в отдельных объемах, называется самодиффузией. Диффузия, связанная с изменением концентрации, называется гетеродиффузией. Она происходит в сплавах с повышенным содержанием примесей.

При циклической диффузии (рис. 1.4, а) совместно перемещаются группы атомов (атомы 1—4). Такая диффузия не требует больших затрат энергии, но маловероятна. При обменном механизме диффузии (рис. 1.4, б) атомы меняются местами (атомы 1 и 2). При вакансионной диффузии (рис. 1.4, в) происходит замещение

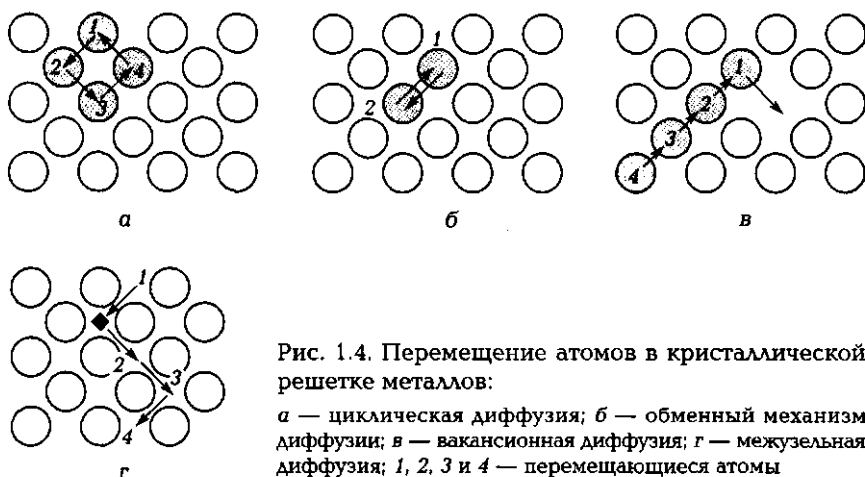


Рис. 1.4. Перемещение атомов в кристаллической решетке металлов:

а — циклическая диффузия; б — обменный механизм диффузии; в — вакансионная диффузия; г — межузельная диффузия; 1, 2, 3 и 4 — перемещающиеся атомы

ние вакансий. Этот механизм приводит к перемещению точечных дефектов в глубь поликристалла. При межузельной диффузии (рис. 1.4, д) атомы примесей, имеющие малый атомный радиус (черный квадрат), перемещаются в межузельном пространстве.

Скорость диффузии зависит от энергии атомов, т.е. от степени нагрева тела. Наиболее легко диффузия протекает по границам и по поверхности зерен, где сосредотачиваются дефекты кристаллического строения.

1.3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Кристаллизация — переход металла (сплава) из жидкого состояния в твердое — происходит в условиях, когда расплав переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей свободной энергией (свободная энергия кристалла меньше свободной энергии жидкой фазы). Влияние температуры на свободную энергию жидкой ($G_{ж}$) и твердой фазы ($G_{т}$) показано на рис. 1.5, а. При температуре плавления $T_{пл}$ жидкая и твердая фазы существуют одновременно. Реальный процесс кристаллизации протекает при переохлаждении металла ниже теоретической температуры кристаллизации $T_{пл}$. Величина $\Delta T = T_{пл} - T_{кр}$ называется степенью переохлаждения.

Термические кривые, характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разной скоростью, приведены на рис. 1.5, б (v — скорость охлаждения, $v_1 < v_2 < v_3$). Вначале, когда металл находится в жидком состоянии, температура системы уменьшается плавно. При достижении температуры $T_{пл}$ на кривой охлаждения появляется горизонтальная площадка, так как отвод теплоты в окружающую среду компенсируется выделяющейся при кристаллизации скрытой теплотой кристаллизации. По окончании кристаллизации температура вновь уменьшается плавно. При медленном охлаждении (v_1) степень переохлаждения мала, и кристаллизация протекает при температуре, близкой к теоретической температуре кристаллизации $T_{пл}$. С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает, и кристаллизация происходит при более низких температурах. Чем «чище» жидкий металл, тем выше температура переохлаждения. Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается в процессе роста их числа и размеров. С повышением степени переохлаждения увеличиваются число зародышей и скорость кристаллизации. Но

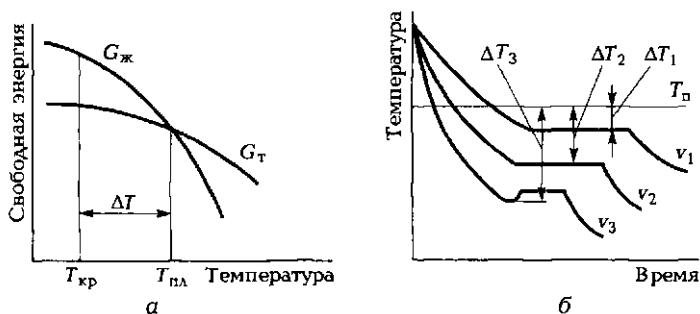


Рис. 1.5. Охлаждение расплава и начало кристаллизации:

a — изменение свободной энергии (G) в жидком ($G_{ж}$) и твердом ($G_{т}$) состояниях в зависимости от температуры: $T_{кр}$ — температура начала кристаллизации; $T_{пл}$ — температура, при которой жидкая и твердая фазы существуют одновременно; ΔT — степень переохлаждения; *б* — кривые охлаждения металлов при кристаллизации: ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 — степень переохлаждения при скорости охлаждения v_1 , v_2 , v_3 соответственно

при дальнейшем повышении степени переохлаждения скорость роста зародышей и скорость кристаллизации уменьшаются.

Рост кристаллов заключается в присоединении к зародышам все новых атомов из жидкой фазы (рис. 1.6, *а*). Центры кристаллизации — зародыши (закрашенные квадратики) — самопроизвольно возникают при переохлаждении металла. Очень маленькие зародыши неустойчивы, возникнув, они растворяются. Чем больше степень переохлаждения, тем устойчивее зародыши, тем меньше их критический размер. Далее зародыши увеличиваются в размере, одновременно появляются новые зародыши. Пока число зародышей невелико, кристаллы растут свободно и сохраняют правильную геометрическую форму. В местах соприкосновения отдельных кристаллов рост их отдельных граней прекращается, развиваются грани в тех местах, где есть свободная жидкость. В результате кристаллы не имеют правильной геометрической формы. Такие кристаллы называются кристаллитами. Чем больше центров кристаллизации, тем больше образуется кристаллов в данном объеме, тем мельче окончательный размер кристаллов. Однако уменьшение скорости зарождения числа зародышей при критических температурах ограничивает возможность регулирования их размера повышением скорости охлаждения. С целью регулирования размеров зерен часто применяют искусственное введение в расплав веществ, создающих центры кристаллизации (модифицирование). В технических металлах в качестве центров кристаллиза-

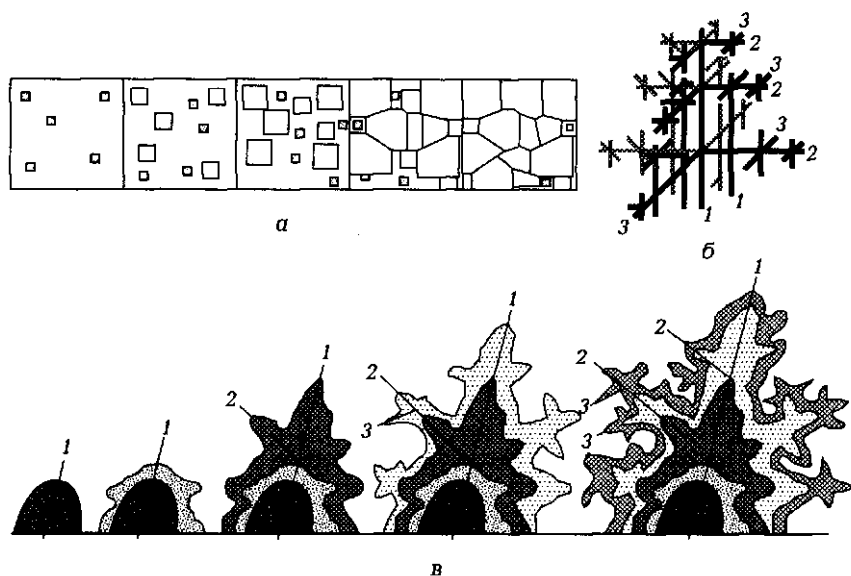


Рис. 1.6. Схема кристаллизации металла:

а — схема роста кристаллов; б — структура дендрита; в — схема образования дендрита; ■ — зародыши; 1, 2 и 3 — оси кристаллизации

ции часто выступают инородные включения (например, шлаковые включения, частички футеровки печи, оксиды металлов).

В большинстве случаев кристаллизация металлов происходит с большой скоростью (кристаллизация при заливке металла в изложницу, кристаллизация расплава при литье в металлические формы). При ускоренном охлаждении металла кристаллы растут неравномерно. Рост зародышей по одной из осей (в направлении наибольшего градиента температур) значительно опережает рост по другим осям, происходит так называемая дендритная кристаллизация. Д. К. Чернов, описывая рост дендрита (рис. 1.6, б), ввел понятие «порядок осей кристаллизации». После образования зародыша его развитие (рис. 1.6, в) идет в направлении наибольшего градиента температур (ось первого порядка). Увеличение размеров осей первого порядка происходит не только в длину, одновременно увеличивается и ее ширина. В дальнейшем от осей первого порядка под определенными углами начинают расти новые оси, называемые осями второго и третьего порядка. По мере роста осей более высокого порядка (четвертого, пятого и т. д.) постепенно заполняются все промежутки, ранее занятые жидким метал-

лом, — дендритная кристаллизация замедляется. Дендритная кристаллизация отчетливо выражена в условиях недостатка жидкого металла для заполнения пространства (поверхностные слои, усадочная раковина) и при наличии примесей и посторонних атомов в расплаве (кристаллизация реальных сплавов).

1.4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

1.4.1. Основные понятия

В металловедении широко используются следующие понятия.

Фаза — однородные составляющие части системы, имеющие одинаковый состав, кристаллическое строение и свойства, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от составных частей поверхностями раздела.

Система — совокупность фаз, находящаяся в состоянии равновесия. **Компоненты** — вещества, образующие систему.

Структура — форма, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах.

Макроструктура — строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении (30 — 40 раз). При исследовании макроструктуры можно наблюдать форму и расположение зерен в литом металле, волокна в поковках и штамповках, дефекты, нарушающие сплошность металла, химическую неоднородность сплава.

Микроструктура — строение металла или сплава, наблюдаемое с помощью микроскопа при больших увеличениях (до 5 000 раз). При исследовании микроструктуры можно наблюдать зерна, форму, размер и взаимное расположение фаз.

Структура и свойства чистых металлов существенно отличаются от структуры и свойств сплавов, состоящих из двух и более компонентов.

Сплав — твердое вещество, полученное путем диффузии компонентов в твердом, жидком или газообразном состоянии.

Диффузия — взаимное проникновение атомов компонентов с образованием новых однородных веществ, называемых фазами.

В зависимости от природы компонентов их атомы по-разному взаимодействуют друг с другом. В расплавленном состоянии все компоненты обычно находятся в атомарном состоянии, образуя

равномерный однородный жидкий раствор. При затвердевании возможно три типа взаимодействия компонентов: твердый раствор (внедрения или замещения), химическое соединение, механическая смесь.

Твердый раствор — фаза, в которой один из компонентов сплава (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а другой (другие) компонент располагается в решетке растворителя, изменяя ее размеры. Различают твердый раствор замещения и твердый раствор внедрения.

При образовании **твердого раствора замещения** атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке.

При образовании **твердого раствора внедрения** атомы растворенного компонента размещаются между атомами растворителя.

Электронное строение и размеры атомов компонентов различны, поэтому при образовании твердого раствора кристаллическая решетка растворителя искажается. Атомы растворенного компонента чаще всего скапливаются у дислокаций, снижая их упругую энергию, поскольку при этом затрачивается минимальное количество энергии. Искажения решетки растворителя также будут минимальными, что определит устойчивость решетки. Искажение кристаллической решетки растворителя приводит к изменению его свойств, однако основное свойство металла-растворителя — способность к пластической деформации сохраняется.

В **химическом соединении** при кристаллизации разнородные атомы соединяются в новое вещество. При этом кристаллическая решетка соединения отличается от решеток компонентов. Всегда сохраняется кратное соотношение компонентов, которое можно выразить формулой A_mB_n , где A и B компоненты; m и n — простые числа. Свойства соединения резко отличаются от свойств компонентов. Например, соединение CuAl_2 имеет значительно большую твердость, чем компоненты Cu и Al . Температура плавления соединения постоянна и отличается от температур плавления компонентов. Образование химического соединения сопровождается выделением или поглощением энергии.

При образовании **механической смеси** атомы каждого компонента укладываются в свои кристаллические решетки, состоящие только из собственных атомов. Следовательно, при механической смеси свойства сплава будут осредненными свойствами компонентов.

Металловедение позволяет предвидеть характер взаимодействия компонентов в сплавах. Если атомные объемы и температуры плавления компонентов незначительно отличаются, то в жидком состоянии эти компоненты обладают *неограниченной растворимостью* (например, пары Fe—Ni, Fe—Co, Cu—Al, Cu—Zn). Неограниченную растворимость, т.е. способность образовывать твердые растворы в любом объеме, имеют металлы с одинаковым типом решеток (расположенные близко друг к другу в Периодической таблице Д. И. Менделеева).

Ограниченную растворимость имеют металлы со значительной разностью атомных объемов и температур плавления (Al—Bi, Zn—Pb, Cu—Pb, Cu—Sn), причем, чем больше разница, тем меньше растворимость. При очень большой разнице в атомных размерах, различном типе кристаллических решеток и пониженной температуре растворимость может быть пренебрежительно малой (получается механическая смесь).

Следовательно, свойства сплава определяются положением элементов в Периодической таблице Д. И. Менделеева, типом и размером их кристаллической решетки, размером атомов. Однако для каждого конкретного набора компонентов существует множество нюансов. Поэтому в металловедении экспериментальным путем определяют взаимодействие компонентов в сплаве и характер получающейся структуры и свойства сплава. С этой целью для конкретного сплава строят экспериментальные кривые охлаждения и нагрева, выявляют его микроструктуру, выясняют тип и параметры кристаллической решетки, определяют его химические, физические и механические свойства. Обобщая полученные данные, строят так называемую диаграмму состояния.

Диаграмма состояния, или фазового равновесия, в удобной графической форме показывает фазовое состояние сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов.

По ней можно установить, какие превращения происходят в сплавах при нагреве (охлаждении), определить температуры затвердевания сплавов. Оценка структурных превращений в сплаве при нагреве позволяет определить режимы и результаты термической обработки сплава. Количественная оценка структуры конкретного сплава позволяет прогнозировать его поведение в заданном интервале температур.

При построении диаграммы состояния используют правило фаз.

Правило фаз устанавливает возможное число фаз и условия, при которых они могут существовать в конкретной системе:

$$C = K + B - \Phi,$$

где C — число степеней свободы, определяет число независимых переменных (температура, концентрация сплава, давление и др.), которое можно изменять, не нарушая равновесия в системе, т. е. не изменяя числа фаз; K — число компонентов; B — число внешних переменных факторов; Φ — число фаз.

Для металлических сплавов можно принять $B = 1$ (в качестве внешних факторов учитывается только температура).

Рассмотрим равновесие однокомпонентной системы (чистый металл). Если в системе существует только одна фаза (жидкая или твердая), то $K = 1$, $\Phi = 1$. Следовательно, $C = 1 + 1 - 1 = 1$ — имеется одна степень свободы. Это означает, что в определенном интервале температур металл можно нагревать (охлаждать), сохраняя однофазное состояние. Если в момент плавления (затвердевания) в системе существуют две фазы (жидкая и твердая), то $K = 1$, $\Phi = 2$. Следовательно, $C = 1 + 1 - 2 = 0$ — степеней свободы нет. Такое равновесие возможно только при постоянной температуре. То есть температура плавления (затвердевания) для чистого металла постоянна. Пока одновременно существует две фазы, температура не изменится.

Для двухкомпонентной системы при наличии двух фаз (затвердевание системы) $K = 2$, $\Phi = 2$. Следовательно, $C = 2 + 1 - 2 = 1$ — имеется одна степень свободы. Равновесие системы сохраняется в интервале температур (температуры начала и конца кристаллизации).

1.4.2. Диаграммы состояния сплавов, образующих механическую смесь

Компоненты данных сплавов неограниченно растворяются в жидкой фазе и не растворимы в твердой. Смесь кристаллов в сплаве называют *эвтектической* или *эвтектикой*, если она кристаллизовалась из жидкости при температуре более низкой, чем температура плавления отдельных компонентов, образующих сплав.

Допустим, два компонента A и B образуют механическую смесь. Экспериментально установлено (рис. 1.7):

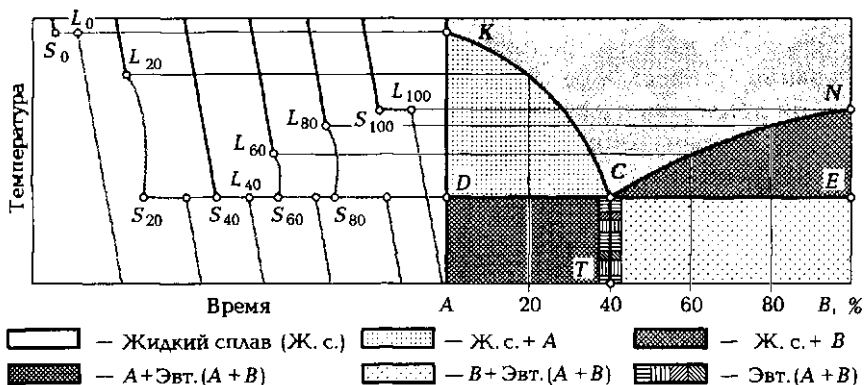


Рис. 1.7. Построение диаграммы состояния сплавов, образующих механическую смесь компонентов:

A, B — компоненты сплава; Эвт. — эвтектика; $L_0, L_{20}, L_{40}, L_{60}, L_{80}, L_{100}$ — температура начала кристаллизации раствора при концентрации компонента B соответственно 0, 20, 40, 60, 80, 100 %; $S_0, S_{20}, S_{40}, S_{60}, S_{80}, S_{100}$ — температура конца кристаллизации раствора при концентрации компонента B соответственно 0, 20, 40, 60, 80, 100 %; CT — ордината эвтектики; KCN — линия ликвидуса; DCE — линия солидуса

- температура начала кристаллизации зависит от концентрации одного из компонентов (точки ликвидуса $L_{20}, L_{40}, L_{60}, L_{80}$);
- температура конца кристаллизации не зависит от концентрации компонентов, т.е. постоянна (точки солидуса $S_{20}, S_{40}, S_{60}, S_{80}$).

Для чистых металлов (концентрация 0 и 100 %) разница температур начала и конца кристаллизации равна нулю (для A — точки L_0 и S_0 , для B — точки L_{100} и S_{100}).

Если перенести с кривых охлаждения значения критических температур на сетку с координатами температура — концентрация, получим линии солидуса — DCE и ликвидуса — KCN , т.е. диаграмму состояния, на которой отчетливо видны шесть зон:

- линия CT — сплав с температурой кристаллизации более низкой, чем температура плавления отдельных компонентов, образующих эвтектический сплав, или эвтектику. Кристаллизация эвтектического сплава носит особый характер. Температуры начала и конца кристаллизации совпадают, практически одновременно выделяются оба кристалла (A и B), основная масса которых собирается в своих определенных местах (восходящая диффузия), но в отдельных объемах возможны отклонения от среднего состава (флуктуации). Эти флуктуации и являются центрами кристаллизации. Кристаллизация эвтектики проис-

ходит одновременно во многих центрах, поэтому эвтектическая смесь состоит из множества мелких кристаллов. Вновь образованный кристалл одного компонента является новым центром кристаллизации другого компонента (идет наложение кристаллов), поэтому эвтектика имеет пластинчатое строение. Причем, чем больше поверхностное натяжение металла, тем более округлыми получаются кристаллы;

- зона *KCN* — жидкая фаза;
- зона *DCT* — твердая фаза, состоящая из механической смеси: крупные кристаллы *A* и эвтектика (*A + B*) пластинчатого строения;
- зона *ECN* — твердая фаза, состоящая из механической смеси: крупные кристаллы *B* и эвтектика (*A + B*) пластинчатого строения;
- зона *KCD* — жидкая фаза + кристаллы компонента *A*;
- зона *TCE* — жидкая фаза + кристаллы компонента *B*.

1.4.3. Диаграммы состояния сплавов, образующих твердые растворы

Сплавы с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Компоненты этих сплавов имеют одинаковые по типу и близкие по параметрам кристаллические решетки (например, Fe—Ni, Fe—Co, Fe—V, Cu—Ni, Au—Ag и др.). В общей кристаллической решетке основного компонента (растворителя) атомы второго компонента могут располагаться по типу внедрения или замещения. При этом следует иметь в виду, что замещение или внедрение атома с иными размерами, чем атомы растворителя, приводит к искажению кристаллической решетки.

Твердые растворы обозначают следующим образом: слева пишется компонент-растворитель, справа, в скобках, растворенный компонент: *A(B)*. Например: Fe(Ni) — атомы никеля растворены в решетке железа.

В процессе кристаллизации таких сплавов из жидкого раствора выделяются кристаллы твердого раствора. После полного затвердевания структура сплава будет однофазной. Следовательно, на кривых охлаждения нет так называемых остановок (горизонтальных площадок), а на диаграмме состояния нет линий, параллельных оси «Концентрация» (рис. 1.8, *a*). На диаграмме состояния можно выделить три зоны:

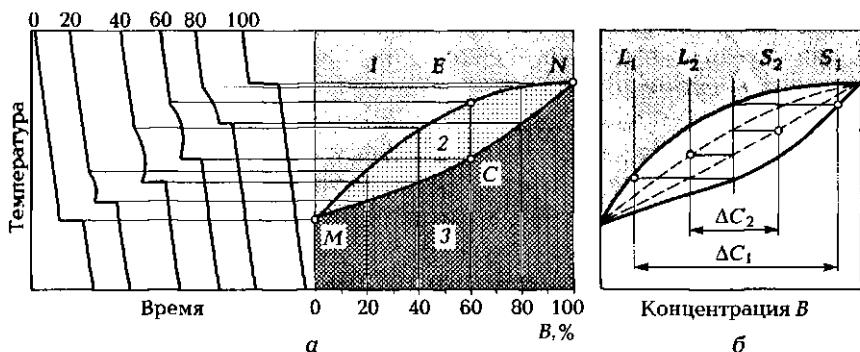


Рис. 1.8. Построение диаграммы состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии:

а — диаграмма состояния: 0, 20, 40, 60, 80 и 100 — кривые охлаждения сплава при концентрации компонента *В* соответственно 0, 20, 40, 60, 80 и 100%; *MEN* — линия ликвидуса; *MCN* — линия солидуса; 1 — зона жидкого состояния сплава; 2 — зона кристаллизации сплава; 3 — зона твердого состояния сплава; *б* — диаграммы состояния при разных скоростях охлаждения сплава: *L*₁, *L*₂, *S*₁ и *S*₂ — точки соответственно ликвидуса и солидуса для большей (1) и меньшей (2) скоростей охлаждения сплава; ΔC_1 и ΔC_2 — степень дендритной ликвации для большей (1) и меньшей (2) скоростей охлаждения сплава

- зона 1 — выше линии ликвидуса *MEN* сплав находится в жидком состоянии;
- зона 2 — между линиями ликвидуса *MEN* и солидуса *MCN* начинается кристаллизация сплава. По правилу фаз, число степеней свободы равно 1: $C = 2 + 1 - 2$ (компонентов — 2, фаз — 2). Следовательно, кристаллизация происходит в интервале температур и при изменении состава фаз. Из жидкой фазы выделяются кристаллы твердого раствора. С понижением температуры кристаллы твердого раствора продолжают выделяться, состав их меняется по линии солидуса. Одновременно с изменением состава кристаллов происходит изменение состава жидкости. При понижении температуры состав жидкости меняется по линии ликвидуса. Происходит перераспределение атомов компонентов *А* и *В* между жидкой и твердой фазами;
- зона 3 — ниже линии солидуса *MCN* сплав находится в твердом состоянии. Кристаллы сплава однородны и имеют одинаковый состав. Выравнивание состава сплава происходит за счет диффузии (проникновения в кристаллы атомов компонента *А* из жидкого сплава в уже имеющиеся кристаллы твердого раствора). Частично выравнивание состава кристаллов происходит за

счет внутрикристаллической диффузии (за счет диффузии более тугоплавкого компонента из внутренних областей кристаллов к внешним областям).

При кристаллизации твердых растворов отчетливо виден рост дендритов. Ветви первого порядка образуются при более высокой температуре, поэтому концентрация тугоплавкого компонента в них выше. Ветви второго и высших порядков образуются при меньших температурах, поэтому с увеличением номера порядка в них уменьшается концентрация тугоплавкого компонента. При медленном охлаждении состав дендрита выравнивается за счет диффузии. При высокой скорости охлаждения выравнивания не происходит, состав ветвей дендрита будет различным (дендритная, или внутрикристаллическая, ликвация).

С помощью диаграммы состояния можно оценить склонность сплава к дендритной ликвации (рис. 1.8, б). Рассмотрим быстрое охлаждение сплава. Первые ветви дендрита имеют состав, соответствующий точке S , а последние ветви — точке L . Максимальное различие по составу (степень дендритной ликвации) равно ΔC_1 . При низкой скорости охлаждения диаграмма состояния сужается. Расстояние между точками L_2 и S_2 равно ΔC_2 , $\Delta C_2 < \Delta C_1$, следовательно, степень дендритной ликвации будет меньше. Диаграмма показывает также, что *дендритная ликвация исправима, если сплав в твердом состоянии медленно нагреть до температуры, при которой интенсивно протекает диффузия (несколько ниже линии солидуса)*.

Сплавы, образующие ограниченные твердые растворы и эвтектику, достаточно часто встречаются в практике. Они характерны тем, что один из компонентов неограниченно растворяется в другом жидком компоненте, а в твердом — или совсем не растворяется, или растворяется ограниченно.

Если подобрать количество растворяемого компонента больше предела растворимости при заданной температуре, то часть компонента, превышающая предел растворимости, не войдет в твердый раствор, а образует механическую смесь с кристаллами насыщенного твердого компонента. В сплаве будут находиться две фазы. Чаще всего с повышением температуры растворимость компонента увеличивается. При нагреве такого двухфазного сплава до температуры плавления появится третья фаза — жидкий сплав. Следовательно, на диаграмме состояния (рис. 1.9) должна быть линия, параллельная оси «Концентрация», характеризующая появление жидкой фазы в сплавах, имеющей концентрацию выше предельной.

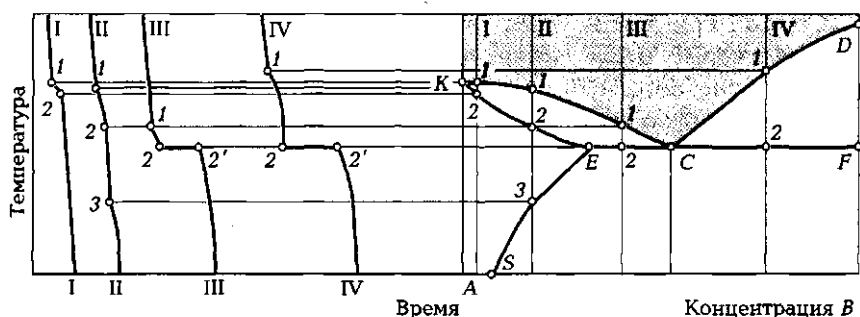


Рис. 1.9. Построение диаграммы состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы и эвтектику:

I, II, III и IV — сплавы с различной концентрацией компонента B в компоненте A; 1 — точка ликвидуса; 2 — точка солидуса; 3 — точка вторичной кристаллизации; KCD — линия ликвидуса; KECF — линия солидуса; SE — линия изменения растворимости компонента B в компоненте A

На этой диаграмме линия KCD — линия ликвидуса, линия KECF — солидуса, линия ECF — линия эвтектики. Точка E характеризует предельную растворимость компонента B в компоненте A при эвтектической температуре. Точка S характеризует предельную растворимость B в A при комнатной температуре. Линия SE показывает изменение растворимости B в A в твердом состоянии при изменении температуры (растворимость с повышением температуры увеличивается).

Следовательно, в сплавах левее линии SE будут ненасыщенные кристаллы A(B), на линии SE — насыщенные кристаллы A(B), правее линии SE будет механическая смесь насыщенных кристаллов A(B) и компонента B. Диаграмма состоит как бы из двух частей: левее точки E — диаграмма состояния твердого неограниченного раствора, правее точки E — диаграмма состояния сплава, состоящего из механической смеси.

Рассмотрим кристаллизацию сплавов при разной концентрации компонента B.

Состав сплава записывают следующим образом: буквенный или цифровой индекс у обозначения фазы или структурной составляющей показывает состав (точку на диаграмме состояния), который имеет данная фаза или структурная составляющая. Например: запись $A(B)_E$ обозначает кристаллы твердого раствора компонента B в A, соответствующего точке E; запись «Эвт. $C[A(B)_E + B]$ » означает: эвтектика состава точки C, состоящая из кристаллов твердого раствора B в A состава точки E и кристаллов B.

Сплав I кристаллизуется так же, как и неограниченный твердый раствор. В точке ликвидуса (точка 1) образуются кристаллы твердого раствора $A(B)$. От точки 1 к точке 2 (солидус) образуются новые кристаллы твердого раствора $A(B)$. В точке 2 сплав полностью затвердевает, и новых структурных изменений не происходит.

Сплав II кристаллизуется несколько иначе. В точке 1 начинается кристаллизация, из жидкого сплава выделяются кристаллы $A(B)$. Процесс заканчивается в точке 2. В интервале температур от точки 2 до точки 3 начинается вторичная кристаллизация (образование новых зерен в твердом состоянии). Так как растворимость B в A меняется по линии SE , то ниже точки 3 в сплаве находится больше компонента B , чем это возможно, поэтому избыточная часть компонента B будет выделяться в твердом растворе (эта часть компонента обычно обозначается B_{11}).

Выделение вторичных кристаллов происходит до полного охлаждения сплава (до концентрации, соответствующей точке S). Вторичные кристаллы значительно мельче первичных, так как их выделение идет в «стесненных условиях». Чем ближе сплав к точке E , тем больше выделяется вторичных кристаллов. Точка E соответствует максимальному выделению вторичных кристаллов. При медленной термической обработке сплавов выделение мелких вторичных кристаллов приводит к упрочнению сплава. При больших скоростях охлаждения вторичные кристаллы могут не успеть выделиться, и сплав будет однофазным (пересыщенный твердый раствор).

Сплав III — доэвтектический. Кристаллизация начинается при температуре, соответствующей точке 1. В результате выделяются кристаллы $A(B)$. Состав этих кристаллов будет меняться по линии KE . При эвтектической температуре (соответствующей точке 2) выделившиеся кристаллы $A(B)$ имеют состав, отвечающий точке E . При этом жидкая часть сплава, изменяясь по линии KC , будет эвтектической (точка C). Кристаллизуясь, жидкий эвтектический сплав образует эвтектику Эвт. _{E} $[A(B)_E + B]$. Кристаллизация эвтектики происходит при постоянной температуре ($2-2'$). После полного охлаждения структура сплава будет состоять из $A(B)_S + B_{11} + \text{Эвт.}_C[A(B)_S + B]$. Однако мелкие кристаллы B_{11} объединятся с кристаллами B в однородные зерна, поэтому эвтектику можно записать так: Эвт. _{C} $[A(B)_S + B]$. Для того чтобы различать кристаллы первичной и вторичной кристаллизации, первичным кристаллам присваивается индекс «1». Окончательную структуру сплава III можно записать в виде $A(B)_{1S} + B_{11} + \text{Эвт.}_C[A(B)_S + B]$.

Сплав IV — заэвтектический. При температуре, соответствующей точке 1, начинается выделение первичных кристаллов B_1 . Эти кристаллы растут в жидкой среде с большими скоростями роста и малым сопротивлением внешней среды, поэтому они вырастают крупными. По достижении точки 2 концентрация жидкого сплава соответствует эвтектической. Сплав затвердевает. От точки 2 до полного охлаждения сплава из кристаллов эвтектики Эвт._Е[$A(B)_E + B$] будут выделяться вторичные кристаллы, которые присоединятся к кристаллам B внутри эвтектики. После полного охлаждения сплав будет иметь состав $B_1 + \text{Эвт.}_C[A(B)_S + B]$.

1.5. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВАХ

Сплавы на основе железа — черные сплавы (сталь и чугун) широко применяются в машиностроении. В современных сельскохозяйственных машинах до 80 % по массе или до 60 % по номенклатуре — сталь и чугун.

Железо — серебристо-белый металл, находится в 8-й группе Периодической таблицы Д. И. Менделеева, его атомный номер 26, атомная масса 55,8, атомный радиус $1,27 \cdot 10^{-10}$ м (0,127 нм), температура плавления 1539°C . При температуре выше 768°C (точка Кюри) железо теряет свои магнитные свойства. Чистое железо (которое можно получить современными металлургическими способами) содержит 0,0001 % примесей. Техническое железо содержит 0,1...0,2 % примесей. Железо имеет два типа кристаллических решеток: ОЦК и ГЦК. В интервале температур $1539 \dots 1392^\circ\text{C}$ железо имеет полиморфную модификацию Fe_α с решеткой ОЦК; в интервале температур $1392 \dots 911^\circ\text{C}$ — модификацию Fe_γ с решеткой ГЦК; ниже температуры 911°C — модификацию Fe_δ с решеткой ОЦК.

На кривой охлаждения железа, показанной на рис. 1.10, приняты следующие обозначения: критические точки превращения $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ и $\text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\delta$ соответственно A_4 и A_3 ; точка Кюри (изменение магнитных свойств железа) — A_2 . Остановка при температуре 1539°C связана с началом кристаллизации Fe_α . Остановки при температурах 1392 и 911°C связаны с полиморфными превращениями железа. Остановка при 768°C связана с изменением магнитных свойств железа.

При взаимодействии железа с углеродом он может растворяться в решетках железа по механизму внедрения и образовывать

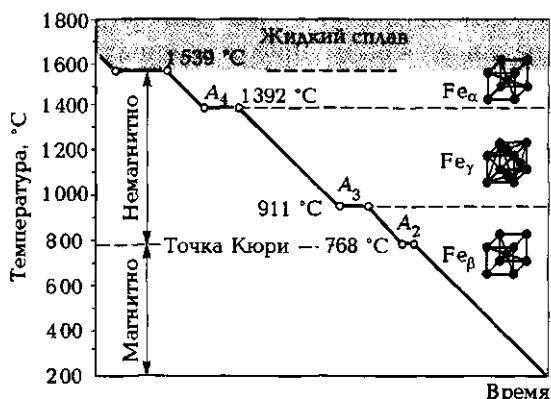


Рис. 1.10. Кривая охлаждения железа:

A_2 — точка Кюри; A_3 — точка превращения $Fe_\beta \leftrightarrow Fe_\gamma$; A_4 — точка превращения $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$

соединения Fe_3C и Fe_2C . Соединение Fe_3C содержит наименьшую концентрацию углерода (6,67 %), поэтому часть диаграммы «железо—углерод» до концентрации 6,67 % можно рассматривать как самостоятельную диаграмму $Fe - Fe_3C$ (рис. 1.11).

В системе $Fe - Fe_3C$ различают следующие фазы: жидкий сплав (Ж); твердую феррит (Ф) — твердый раствор углерода и других примесей в Fe_α , различают низкотемпературный феррит $_\alpha$ с растворимостью углерода до 0,02 % и высокотемпературный феррит $_\delta$ с предельной растворимостью углерода 0,1 %; аустенит (А) — твердый раствор углерода и других примесей в Fe_γ , предельная растворимость углерода в Fe_γ 2,14 %; цементит (Ц) — карбид железа Fe_3C со сложной ромбической плотно упакованной кристаллической решеткой, до температуры 210 °C (обозначается A_0) цементит ферритмагнитен; графит (Г) — имеет слоистую гексагональную решетку.

Анализ диаграммы состояния показывает, что некоторые ее части схожи с диаграммами, рассмотренными ранее.

Правая верхняя часть диаграммы (линия $BCDFEB$) соответствует диаграмме эвтектического типа. Линии BC (ликвидус) и JE (солидус) показывают температуры начала и конца кристаллизации с образованием аустенита. Линия CD отвечает температурам начала кристаллизации цементита. Линия ECF — температура, при которой происходят эвтектические превращения в сплавах.

Линии GS , GP соответствуют температурам начала и конца полиморфного превращения аустенит \leftrightarrow феррит. Линия SE — пре-

дельная растворимость углерода в Fe_γ (предельная концентрация углерода в аустените). Линия PQ — предельная растворимость углерода в Fe_α . Линия MO показывает температуру превращения феррита из магнитного состояния в немагнитное.

Из диаграммы видно, что при содержании углерода менее 2,14 % кристаллизация жидкого сплава происходит с выделением кристаллов аустенита. Эти сплавы железо — углерод получили название «сталь». Ниже линии GSE начинается распад аустенита на фазы: феррит, цементит, перлит. Перлит (П) — эвтектоидная смесь феррит + цементит.

При охлаждении до комнатной температуры получаем сплавы различного структурного состава. Левее линии QP — техническое железо (механическая смесь феррита $_\alpha$ + 0,0006 % углерода). Правее линии QP — сталь. До концентрации 0,8 % углерода — доэвтекто-

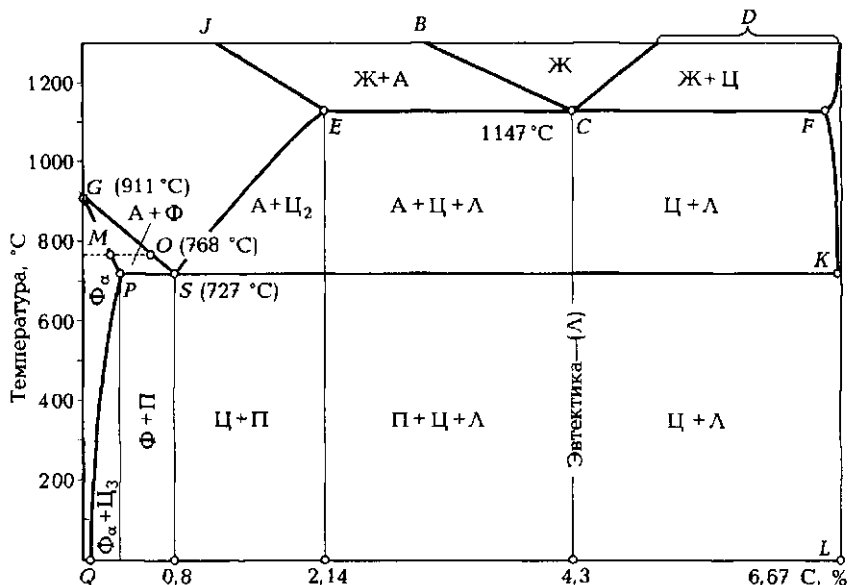


Рис. 1.11. Диаграмма состояния сплава железо — углерод:

А — аустенит; Ж — жидкость; Л — ледебурит; П — перлит; $Ф_\alpha$ — феррит $_\alpha$; Ц — цементит первичный; $Ц_2$ — цементит вторичный; $Ц_3$ — цементит третичный; D — точка плавления аустенита; G — точка полиморфных превращений $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$; BC и JE — соответственно линии ликвидуса и солидуса жидкого сплава с образованием кристаллов аустенита; CD — линия начала кристаллизации жидкого сплава с образованием кристаллов цементита; ECF — эвтектическая горизонталь; PSK — эвтектоидная горизонталь; SE — линия предельной растворимости углерода в Fe_γ ; PQ — линия предельной растворимости углерода в Fe_α ; MO — линия Кюри

идная сталь (при концентрации менее 0,025 % углерода — механическая смесь феррит_α + цементит, при концентрации более 0,025 % — механическая смесь феррит_α + перлит). При концентрации 0,8 % углерода — эвтектоидная сталь (перлит). При концентрации более 0,8 % углерода — заэвтектоидная сталь (механическая смесь цементит + перлит).

Левая часть диаграммы включает в себя сплавы с содержанием углерода более 2,14 %. Эти сплавы претерпевают эвтектическую кристаллизацию при температуре 1147 °С (по линии *ECF*). При 1147 °С жидкий сплав состава, отвечающего точке *C* (4,3 % углерода), кристаллизуется с образованием эвтектической смеси кристаллов аустенита (концентрация углерода 2,14 %) и цементита, получившей название «*ледебурит*» (*Λ*).

Сплавы с содержанием углерода более 2,14 % получили название «*белые чугуны*». Белыми эти чугуны названы потому, что они практически не содержат свободного углерода и излом таких чугунов светлый, блестящий.

Данные сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на *доэвтектические чугуны* (до 4,3 % углерода), конечная их структура — $P + C_1 + \Lambda$; *эвтектические чугуны* (4,3 % углерода), структура — Λ ; *заэвтектические чугуны* (более 4,3 % углерода), структура — $C_1 + \Lambda$.

В ледебурите более половины его количества составляет цементит — твердая и хрупкая фракция. Эвтектика (ледебурит) делает чугун твердым и хрупким. Чем больше углерода в сплаве, тем более хрупким является чугун.

1.6. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ

Поведение под воздействием приложенных внешних нагрузок определяют механические свойства материалов:

- **прочность** — сопротивление материала деформации и разрушению;
- **упругость** — свойство материала восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки;
- **твёрдость** — свойство материала сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела;
- **хрупкость** — свойство материала разрушаться без заметного поглощения механической энергии в необратимой форме;

- **вязкость** — свойство материала, не разрушаясь, поглощать в заметных количествах механическую энергию в необратимой форме;
- **изнашиваемость** — свойство материала подвергаться поверхностному разрушению или повреждению под воздействием внешнего трения;
- **выносливость** — свойство материала выдержать, не разрушаясь, большое число повторно-переменных напряжений;
- **усталость** — постепенное разрушение материала при большом числе повторно-переменных напряжений;
- **ползучесть** — способность материала медленно и непрерывно деформироваться при постоянном напряжении и повышенной температуре.

Количественные (числовые) значения прочностных параметров определяются стандартными испытаниями: статические (на растяжение, сжатие, изгиб, кручение); динамические (на ударную вязкость); на усталость при цикловых нагрузках; технологические.

Статические испытания осуществляются при медленном возрастании нагрузок. Основным видом испытаний является **испытание на растяжение** (ГОСТ 1497—84), позволяющее определить прочность материала и его склонность к упругим и пластическим деформациям. При испытаниях на специальной разрывной машине растягивают стандартный образец. Машина снабжена автоматической записью зависимости между нагрузкой и абсолютным удлинением (рис. 1.12), на основании которой строят диаграмму растяжения и рассчитывают напряжения при различных условиях деформирования образца:

$$\sigma = F/A_0,$$

где F — усилие, Н; A_0 — начальная площадь поперечного сечения образца, мм².

По диаграмме растяжения определяют основные характеристики прочности.

Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ — напряжение, при котором зависимость «нагрузка — удлинение» перестает быть прямолинейной. Участок OP — участок упругой деформации материала, т.е. деформации, после снятия которой образец возвращается в первоначальное положение; $\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}}/A_0$.

Предел упругости $\sigma_{0,05}$ — напряжение, при котором остаточное удлинение образца достигает 0,05 % его начальной длины (l_0); $\sigma_{0,05} = F_y/A_0$.

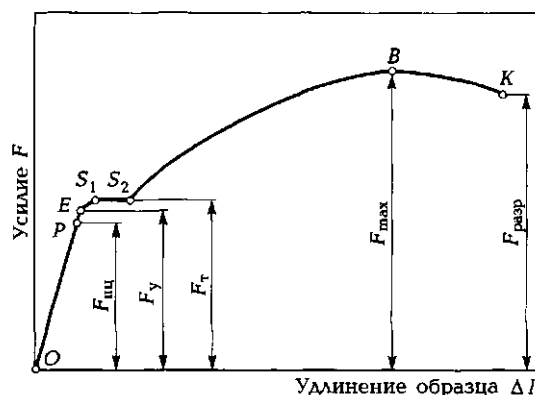


Рис. 1.12. Диаграмма растяжения металлов:

OP — участок упругой деформации; E — точка удлинения образца на 0,05 %; S_1S_2 — площадка текучести; B — наибольшая нагрузка на образец; K — разрушение образца; $F_{упр}$ — наибольшее усилие упругой деформации; F_y — усилие предела упругости; F_t — усилие предела текучести; F_{max} — усилие, предшествующее разрушению образца; $F_{разр}$ — усилие истинного сопротивления разрыву

Предел текучести σ_t — наименьшее напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % l_0 ; $\sigma_t = F_t/A_0$. Точка P показывает начало пластических деформаций образца.

Временное сопротивление σ_b — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке F_{max} , предшествующей разрушению образца.

Истинное сопротивление разрыву — напряжение, определяемое отношением нагрузки $F_{разр}$ к фактической площади поперечного сечения образца в месте разрыва.

Относительное удлинение (%) после разрыва δ — отношение приращения длины образца после разрыва к его первоначальной длине.

Испытание на твердость, вследствие его простоты и производительности, наиболее распространенный метод испытаний. При этих испытаниях в поверхность образца (детали или заготовки) вдавливают стандартные наконечники из недеформируемых материалов (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса).

Сущность **метода Бринелля** заключается во вдавливании в образец стального закаленного шарика (рис. 1.13, а). По диаметру полученного отпечатка определяют твердость образца. Диаметр шарика — 2,5; 5; 10 мм. Нагружение ступенчатое: предварительная нагрузка — 980 Н; основная нагрузка — 2 943 Н (стальной или чугунный образец); 9 800 Н (образец из алюминия, меди, никеля и

их сплавов); 2 450 Н (образцы из мягких сплавов). Твердость по Бринеллю определяется по формуле

$$HB = 2F / \left(\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right),$$

где F — усилие, Н; D — диаметр шарика, мм; d — диаметр отпечатка, мм.

Твердость по Бринеллю обозначается соответствующим числом (200 HB) или диаметром отпечатка (чем меньше диаметр, тем выше твердость). Между числом твердости и временным сопротивлением существуют следующие зависимости: для стали $\sigma_b = 0,34$ HB; для медных сплавов $\sigma_b = 0,45$ HB; для алюминиевых сплавов $\sigma_b = 0,35$ HB.

Не рекомендуется применять метод Бринелля для сталей с твердостью более 450 HB и для цветных сплавов с твердостью более 200 HB.

Сущность метода Роквелла заключается во вдавливании в образец алмазного наконечника с углом при вершине 120° (шкала А или С) или стального шарика диаметром 1,5875 мм (шкала В) в образец (рис. 1.13, б). По глубине вдавливания h определяют твердость. Нагружение ступенчатое: предварительная нагрузка $F_0 = 98$ Н; основная нагрузка F зависит от применяемой шкалы (для шкалы А — 588 Н, В — 980 Н, С — 1 470 Н). Твердость определяется по формулам:

- для шкалы А или С $HRA (HRC) = 100 - (h - h_0)/0,002$;
- для шкалы В $HRB = 130 - (h - h_0)/0,002$.

Здесь h — глубина вдавливания шарика или наконечника; h_0 — глубина предварительного вдавливания наконечника.

Шкала А используется для испытания твердых сплавов, твердого тонкого листового материала. Предельные числа твердости

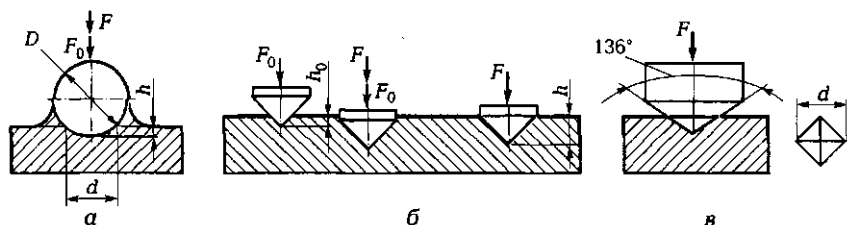


Рис. 1.13. Схемы определения твердости образца методами:

а — Бринелля; б — Роквелла; в — Виккерса; F_0 — предварительная нагрузка; F — основная нагрузка; D — диаметр шарика; d — диаметр или длина диагонали отпечатка; h_0 — глубина предварительного вдавливания наконечника; h — глубина вдавливания шарика или наконечника

70...85 HRA. Шкала С используется для испытания сплавов, прошедших термическую обработку. Предельные числа твердости 20...67 HRC. Шкала В используется для испытания металлов средней твердости. Предельные числа твердости 20...100 HRB.

Для испытаний листовых материалов, тонких деталей используется *метод супер-Роквелла*. В отличие от метода Роквелла, в данном методе применяют малые нагрузки: $F_0 = 29,4 \text{ Н}$, $F = 147; 294; 441 \text{ Н}$. Используют шкалу N — вдавливают алмазный наконечник или шкалу Т — вдавливают стальной шарик. Твердость определяется по формулам:

- для шкалы N $\text{HRN} = 100 - (h - h_0)/0,001$;
- для шкалы Т $\text{HRT} = 130 - (h - h_0)/0,001$.

Обозначение: 75 HRN 147 (твердость 75 единиц, шкала N, нагрузка 147 Н) или 49 HRT 294.

Сущность *метода Вickers* заключается во вдавливании в образец правильной четырехгранной алмазной пирамидки с квадратным основанием и углом между противоположными гранями 136° (рис. 1.13, в). Под действием статической нагрузки 49...980 Н за 10...60 с пирамидка внедряется в образец. Твердость определяют по величине диагонали отпечатка d :

$$\text{HV} = 1,8544F/d^2.$$

Метод позволяет определить как самые высокие значения твердости (при нагрузке 980 Н), так и самые низкие (при нагрузке 49 Н).

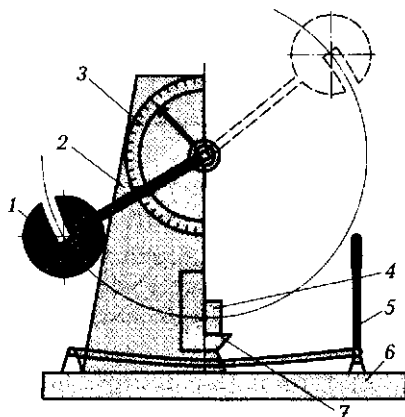


Рис. 1.14. Схема маятникового копра:

1 — нож; 2 — стойка; 3 — шкала; 4 — образец; 5 — ручной тормоз; 6 — основание; 7 — опоры

Динамические испытания проводятся при скоростях деформирования больших, чем при статических испытаниях. Динамические испытания **на ударный изгиб** выявляют склонность материала к хрупкому разрушению. Испытания основаны на ударном разрушении образца с концентратором напряжений на маятниковом копре (рис. 1.14). На основании 6 установлена стойка 2 с качающимся ножом 1. Угол поворота ножа вокруг горизонтальной оси отмечается по шкале 3. При обратном ходе нож тормозится ручным тормозом 5. Образец 4 установлен на опорах 7. При прямом ходе нож разрушает образец, затрачивая часть накопленной потенциальной энергии. **Ударная вязкость** (КС) — отношение работы разрушения образца к площади его поперечного сечения: $КС = K/S_0$. Стандартные испытания предусматривают применение образцов с тремя видами концентраторов напряжений: пропил с радиусом 1 мм (ударная вязкость КСУ), пропил с радиусом 0,5 мм (ударная вязкость КСВ), образец с усталостной трещиной (ударная вязкость КСТ).

1.7. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Сталь — многокомпонентный сплав, содержащий углерод и примеси (вредные и полезные).

К вредным примесям относятся сера, фосфор, кислород, водород, азот. *Сера* образует химическое соединение FeS , не растворимое в твердом железе. Оно образует с железом эвтектику (температура плавления $988^\circ C$), располагающуюся по границам зерен. При нагреве стали до температуры горячей деформации ($1\ 000 \dots 1\ 200^\circ C$) эвтектика расплавляется, нарушается связь между зернами, появляются надрывы и трещины (красноломкость). *Фосфор*, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку, уменьшает пластичность и вязкость стали. *Азот и кислород* присутствуют в стали в виде неметаллических включений (например, оксиды FeO , $FeOMnO$), твердого раствора или в свободном состоянии. Твердые растворы и неметаллические включения, располагаясь по границам зерен, повышают порог хладноломкости и снижают ударную вязкость стали. В свободном состоянии все газы, включая *водород*, образуют в слитках множество мелких пустот (пористость), что отрицательно сказывается практически на всех механических свойствах стали.

Полезные примеси позволяют улучшить качество стали, поэтому их называют легирующими. Легирующие элементы могут об-

разовывать с железом твердые растворы, легированный цементит, самостоятельные специальные карбиды, интерметаллические соединения.

1.7.1. Влияние легирующих элементов на полиморфные превращения

Все легирующие элементы образуют с железом твердые растворы замещения. Растворяясь в железе, они влияют на температурную область существования модификаций Fe_α , Fe_γ (точки A_3 и A_4 , рис. 1.15).

Элементы Ni, Mn, Cu и др. уменьшают температуру точки A_3 и увеличивают температуру точки A_4 . В результате расширяется область γ -фазы. Под влиянием легирования температурная точка A_4 сдвигается до линии солидуса. Температурная точка A_3 при повышении легирования сдвигается до точки, соответствующей комнатной температуре. Сплавы, имеющие концентрацию легирующего элемента больше соответствующей точке X, не испытывают фазовых превращений $\alpha \leftrightarrow \gamma$ и при всех значениях температуры представляют собой твердый раствор легирующего элемента в Fe_γ . Такие сплавы называются *аустенитными*.

Элементы Ti, Cr, Mo, W, V, Al, Si и др. уменьшают температуру критической точки A_4 и увеличивают температуру критической точки A_3 . При концентрации, соответствующей точке Y, область γ -фазы полностью замыкается. При большей концентрации сплавы состоят из твердого раствора легирующего элемента в Fe_α . Такие сплавы называются *ферритными*.

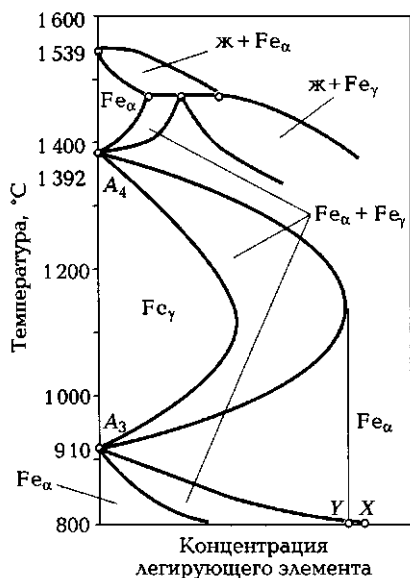


Рис. 1.15. Области существования полиморфных модификаций железа Fe_α и Fe_γ :

A_3 — точка превращения $Fe_\alpha \leftrightarrow Fe_\gamma$; A_4 — точка превращения $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$; ж — жидкая фаза

1.7.2. Структура и свойства легированного феррита и аустенита

Основой большинства современных сталей является легированный феррит. Его легирование сопровождается упрочнением. На более сильное значение предела текучести σ_t увеличивают кремний и марганец, а хром уменьшает. Все легирующие элементы, за исключением никеля, при содержании их в сплаве выше определенного предела снижают ударную вязкость и трещиностойкость. Значения пороговой концентрации легирующих элементов следующие: хром — 1 %, кремний — 0,8 %, марганец — 1,5 %. По отношению к углероду все легирующие элементы можно разделить на две группы: графитизирующие (Si, Ni, Cu, Al) и карбидообразующие (Mn, Cr, Mo, W, Nb, V, Zr, Ti). При малом содержании в стали марганец, хром и вольфрам растворяются в цементите, замещая атомы железа. Состав цементита можно выразить формулой $(FeM)_3C$, где M — легирующий компонент. Марганец может заместить в решетке цементита все атомы железа, хром — до 25 %, молибден — до 3 %, вольфрам — до 1 %. Более сильные карбидообразующие элементы (Ti, V, Nb, Zr) практически не растворяются в цементите и образуют специальные карбиды $(MFe)_mC_n$. Эти карбиды способны растворить железо и другие металлы. При этом вольфрам и молибден наиболее сильно повышают предел текучести σ_t цементита, а кобальт оказывает минимальное влияние.

1.7.3. Влияние легирующих компонентов на свойства стали

Для достижения высокой прокаливаемости в сталь добавляют марганец, хром, бор, никель, молибден. Однако при больших концентрациях этих элементов (выше 1 %) увеличивается порог хладноломкости. Никель повышает сопротивление хрупкому разрушению стали, увеличивает вязкость и пластичность, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений. Молибден повышает устойчивость стали к отпуску, улучшает механические свойства после цементации стали. Ванадий, титан, ниобий, цирконий измельчают зерно, повышают предел прочности на растяжение, уменьшают чувствительность к концентраторам напряжений. Кремний улучшает литейные свойства стали, замедляет процесс отпуска мартенсита, после изотермической закалки обеспечивает высокую вязкость стали.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом вакансии перемещаются в глубь кристаллической решетки?
2. Почему в зоне дислокаций кристаллическая решетка упруго искажена?
3. Почему на границах зерен атомы располагаются иначе, чем в глубине зерна?
4. Что такое самодиффузия атомов?
5. Как происходит кристаллизация металлов и сплавов?
6. Что означает термин «фаза»?
7. Сколько степеней свободы имеет двухкомпонентная система?
8. Что означают термины «точка ликвидуса» и «точка солидуса»?
9. Опишите зоны, наблюдаемые на диаграмме состояния сплавов, образующих механическую смесь.
10. Что характеризует точка E на диаграмме состояния сплава, образующего ограниченный твердый раствор и эвтектику?
11. Какими методами проводят испытание на твердость?
12. Как влияют сера, никель, молибден, титан, кремний на механические свойства сталей?

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В машиностроении применяются металлические конструкционные материалы (черные и цветные металлы и сплавы), порошковые и композиционные материалы, неметаллические материалы (резинотехнические, синтетические смолы, лакокрасочные и др.).

2.1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1.1. Черные металлы и сплавы

Как было отмечено в гл. 1, к черным металлам и сплавам относятся железо и сплавы на его основе (сталь и чугун). Вследствие низких эксплуатационных свойств техническое железо в машиностроении не применяется.

Сталь — многокомпонентный сплав с содержанием углерода до 2,14 %. Чугун — сплав с содержанием углерода более 2,14 %.

Сталь. По содержанию вредных примесей (серы и фосфора) сталь разделяют на четыре группы: группа А — сталь обычного качества, содержание серы менее 0,055 %, фосфора менее 0,07 % (эта сталь имеет самые низкие механические свойства); группа Б — качественная сталь, содержание серы менее 0,035 %, фосфора менее 0,035 %; группа В — высококачественная сталь, содержание серы 0,025 %, фосфора менее 0,025 %; группа Г — особо высококачественная сталь, содержание серы 0,015 %, фосфора менее 0,015 %.

По применению различают строительные стали, конструкционные стали общего назначения, инструментальные стали, конструкционные стали специализированного назначения, стали с

особыми физическими свойствами, стали с особыми химическими свойствами.

В России принята буквенно-числовая система маркировки сталей.

Углеродистые качественные конструкционные стали маркируются двузначным числом, обозначающим содержание углерода в сотых долях процента, например сталь 10 — 0,1 % углерода; сталь 45 — 0,45 % углерода.

Углеродистые качественные инструментальные стали маркируются буквой У и цифрой, указывающей содержание углерода в десятых долях процента, например сталь У8 — 0,8 % углерода; сталь У12 — 1,2 % углерода. **Конструкционные легированные стали** обозначаются: сталь $\alpha_c \Lambda_i \alpha_i A(Ш)$, где α_c — содержание углерода в сотых долях процента (при содержании углерода более 1 % цифру опускают); Λ_i — обозначение легирующего компонента (азот — А, алюминий — Ю, бор — Р, вольфрам — В, ванадий — Ф, кобальт — К, кремний — С, молибден — М, марганец — Г, медь — Д, никель — Н, редкоземельные металлы — Ч, селен — Е, титан — Т, фосфор — П, хром — Х, цирконий — Ц); α_i — содержание легирующего компонента в процентах. Если после обозначения легирующего компонента цифра не стоит, его содержание примерно 1 % (молибден — 0,2...0,3 %, ванадий — 0,06...0,12 %); буква А обозначает высококачественную сталь, буква Ш — особо высококачественную, например: сталь 30Х3МФ — качественная сталь, 0,3 % углерода, 3 % хрома, 0,2...0,3 % молибдена, 0,06...0,12 % ванадия; сталь 40Х — качественная сталь, 0,4 % углерода, 1 % хрома; сталь 12ХНЗА — высококачественная сталь, 0,12 % углерода, 1 % хрома, 3 % никеля. Обозначение быстрорежущих инструментальных сталей приведено в подразд. 6.1.4. Некоторые стали содержат дополнительную букву после слова «сталь», обозначающую ее группу или тип, например Ш — подшипниковая сталь (в этих сталях указываются десятые доли процента содержания легирующего компонента), А — автоматная сталь.

Качественные углеродистые стали (ГОСТ 1050—88) по содержанию углерода разделяют на низкоуглеродистые (концентрация углерода 0,25 %), среднеуглеродистые (концентрация углерода 0,3...0,5 %), высокоуглеродистые (концентрация углерода 0,6...0,85 %).

Низкоуглеродистые стали обладают невысокой прочностью, высокой пластичностью. Сталь 05 — сталь 10 применяется для изготовления малонагруженных деталей. Тонколистовой холоднокатаный прокат используют для холодной листовой штамповки.

Сталь 15 — сталь 25 применяется для ответственных сварных конструкций и для деталей, упрочняемых цементацией.

Среднеуглеродистые стали (сталь 30 — сталь 55) применяют после нормализации, улучшения и поверхностной закалки. По сравнению с низкоуглеродистыми сталями они имеют более высокую прочность, но более низкую пластичность, лучше обрабатываются резанием. Прокаливаемость их невелика (критический диаметр после закалки в воде 10...12 мм). Поэтому их применяют для изготовления небольших деталей или деталей, не требующих сквозной прокаливаемости.

Высокоуглеродистые стали (сталь 60 — сталь 85) обладают повышенной прочностью, износостойкостью и упругостью. Применяют их после закалки и отпуска, нормализации и отпуска, поверхностной закалки. Из них изготавливают детали, работающие при высоких статических и динамических нагрузках.

Низколегированные конструкционные стали (ГОСТ 19282—84) содержат до 2,5 % легирующих компонентов, которые определяют измельчение перлитной составляющей и растворяются в феррите. Для улучшения свариваемости содержание углерода не превышает 0,22 %.

В России выпускается 28 марок этих сталей в виде широкополосного, сортового или фасонного проката, арматуры, гладкого или периодического профиля, поковок или штамповок. Стали широко применяются в авто- и тракторостроении.

Улучшаемые стали (легирование: Cr, Cr—Mn, Cr—Si—Mn, Cr—Ni, Cr—Mo, Cr—V—V) применяются после закалки и высокого отпуска. Они имеют высокую вязкость и высокий предел текучести, обеспечиваемые сквозной прокаливаемостью и мелкозернистой структурой. Стали применяют для изготовления коленчатых валов, зубчатых колес, шатунов, гильз цилиндров и др.

Цементируемые стали (легирование: Cr, Cr—V, Cr—Ni, Cr—Mg, Cr—Mg—Ni и т.д.) содержат 0,1...0,3 % углерода, обладают высокой твердостью и износостойкостью поверхностного слоя, высокой прочностью и вязкостью, хорошо воспринимают цементацию и нитроцементацию. После цементации стали подвергаются двойной закалке и низкому отпуску. Поверхностный слой в результате имеет твердость 60...64 HRC. Из этих сталей изготавливают кулачковые муфты, кулачки, зубчатые колеса, поршневые пальцы, втулки, коленчатые и распределительные валы и т.п.

Автоматные стали (сталь А12—АС14ХГН) применяются при обработке заготовок на металлорежущих станках с автоматиче-

ским циклом. Обычно при точении сталей получается так называемая сливная (в виде непрерывной ленты) стружка, которую трудно убирать при автоматическом цикле работы станка. В автоматных сталях присутствуют хрупкие включения сульфида марганца MnS , вызывающие дробление стружки. Эти стали используют для изготовления метизов (болты, гайки, шпильки, винты), втулок.

Подшипниковые стали (сталь ШХ6 — ШХ15СГ) выпускаются по ГОСТ 801 — 78*. После закалки и низкого отпуска сталь имеет структуру скрытокристаллического мартенсита с дисперсными равномерно рассеянными карбидами $(FeCr_7)C_3$, что определяет твердость 62...65 HRC и высокую износостойчивость. Эти стали используют для изготовления подшипников качения, храповых механизмов, роликов, пальцев машин.

Рессорно-пружинные стали (легирование: Si, Si — Mn, Cr — Si, Cr — Mn, Cr — V, Cr — Mn — V, W — Si, Ni — Si) имеют высокий предел упругости и предел выносливости. Из этих сталей изготавливают пружины и рессоры.

Механические свойства некоторых широко применяемых сталей приведены в табл. 2.1.

Чугун. В чугуне углерод находится в связанном и свободном состоянии. Чугун обладает высокой твердостью, низким пределом прочности при растяжении. Наличие эвтектики обуславливает его хорошие литейные свойства. Хорошие демпфирующие свойства чугунов обусловлены наличием свободного графита. В машиностроении чаще всего применяются отливки из серого, высокопрочного и (реже) ковкого чугуна.

Серый чугун содержит свободный углерод в виде пластинок. По ГОСТ 1412 — 85 серый чугун обозначается числом, показывающим предел прочности при растяжении, например СЧ21: $\sigma_B = 210$ МПа. Ферритный и ферритно-перлитные чугуны марок СЧ10 и СЧ15 обладают наименьшим пределом прочности при растяжении. Серый чугун применяют для изготовления малоответственных деталей.

Наибольшей прочностью обладает перлитный чугун, содержащий включения углерода в виде мелких, равномерно рассеянных пластинок, марок СЧ21 — СЧ35. Он применяется для изделий, работающих при высоких нагрузках или в условиях повышенного изнашивания.

Высокопрочный чугун содержит свободный углерод в виде шаровидных включений, которые значительно меньше ослабляют металлическую основу. Поэтому данный вид чугуна обладает большим пределом прочности при растяжении. По ГОСТ 7293 — 85 высокопрочный чугун обозначается числом, показывающим предел

Таблица 2.1. Механические свойства сталей

Вид стали	Марка стали	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²	Примечание	
Углероди- стая	10	340	210	31	—	После нормализации	
	25	460	280	23	900		
	50	640	380	14	400		
Низколе- гированная	14Г2	470	340	21	700	При +20 °С	Без термооб- работки
					350	При -40 °С	
	10ХГС	530	400	10	500	При -40 °С	
					800	При -70 °С	
Улучшае- мая	30Х	900	700	12	700	После улучшения	
	30ХГСА	1 000	850	10	500		
	40ХН2МА	1 100	950	12	800		
Цементи- руемая	20Х	800	650	11	—	Для дета- лей сече- нием до	35 мм
	25ХГМ	1 200	1 100	10	800		80 мм
Автоматная	А12	420	—	34	—	Без термообработки	
	АС45Г	610	360	—	—	После нормализации	
	АС14ХГН	1 120	850	—	800	После закалки и от- пуска	
Рессорно- пружинная	60С2	1 300	1 200	25	—		
	50ХГ	1 300	1 100	35	—		

прочности при растяжении, например ВЧ 100: $\sigma_b = 1\,000$ МПа. ГОСТ 7293—85 позволяет добавлять в маркировке показатель относительного удлинения, например ВЧ 70-2: $\sigma_b = 700$ МПа, $\delta = 2\%$. Для повышения прочности и создания специальных чугунов (жаростойкие, коррозионно-стойкие) их легируют хромом, никелем, титаном, марганцем, медью, алюминием, свинцом и подвергают отжигу, закалке, отпуску. Высокопрочные чугуны применяют в машиностроении для ответственных изделий (корпуса подшипников, коленчатые валы, головки блоков цилиндров и т.д.).

Ковкий чугун получают длительным отжигом тонкостенных (до 50 мм) отливок из белого чугуна. Ковкий чугун не коут, но он достаточно пластичен. Ковкий чугун содержит свободный хлопьевидный графит и по свойствам занимает промежуточное положение

ние между серым и высокопрочным чугунами. По ГОСТ 1215—79 ковкий чугун обозначается двумя числами: пределом прочности при растяжении и относительным удлинением, например КЧ 35-10: $\sigma_B = 350$ МПа, $\delta = 10\%$. В машиностроении ковкий чугун применяется как заменитель стали при изготовлении зубчатых колес, звездочек, звеньев цепей.

Антифрикционный чугун получают добавлением фосфидной эвтектики в серые, ковкие или высокопрочные чугуны. Они маркируются следующим образом: к буквенному обозначению соответствующего чугуна добавляется буква А, в конце ставится порядковый номер (АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3, АЧС-4, АЧС-6, АЧВ-1, АЧВ-2, АКЧ-1, АЧК-1, АЧК-2).

2.1.2. Цветные металлы и сплавы

Маркировка цветных сплавов вызывает затруднения вследствие ее неоднозначности. Сплавы на основе титана и марганца относятся к группе специальных сплавов, поэтому они имеют оригинальную буквенно-числовую маркировку. На первом месте ставят буквенное обозначение вида сплава (ВТ или ОТ — титановые, МЛ — магниевые литейные, МА — магниевые деформируемые, Ц — цинковые), на втором месте стоит порядковый номер сплава. Остальные сплавы имеют двойную маркировку: современную и традиционную. Современная маркировка похожа на маркировку легированных сталей: на первом месте стоит буквенное обозначение сплава (Л — латунь, Бр — бронза, Н — медно-никелевые сплавы, АЛ — алюминиевые литейные, АК или Д, или АВ, или В — алюминиевые деформируемые, Б — баббиты). Далее стоит буквенное обозначение легирующего компонента и его среднее процентное содержание. Легирующий компонент обозначается по первым буквам его русского названия (А — алюминий, Ж — железо, К — кремний, Мц — марганец, Н — никель, О — олово, С — свинец и т.д.). В технической документации и технической литературе, изданной до 2000 г., в основном используется традиционная маркировка, поэтому рассматриваем ее.

Сплавы на основе титана. Титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью и прочностью при малой плотности. Наибольшее распространение получили сплавы, легированные алюминием, оловом, марганцем, хромом и ванадием. Механические свойства сплавов, выпускаемых промышленностью (ГОСТ 19807—91), приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²	Вид полуфабриката
BT5	750...950	10	500	Отливки, профили, поковки
BT5-1	800...1 000	10	400	Листы, профили, трубы
OT4	700...900	11	400	Листы, полосы, ленты
BT6	950...1 700	8	400	Поковки, листы, трубы
BT14	900...1 050	10	500	Поковки
BT8	1 050...1 250	11	300	Поковки

Сплавы на основе алюминия. Для алюминиевых сплавов характерна относительно большая удельная прочность (отношение $\sigma_{\text{в}}$ к плотности), близкая к характеристикам среднелегированных сталей. Сплавы подразделяются на литейные и деформируемые.

Литейные сплавы имеют хорошие литейные свойства (высокую жидкотекучесть, малую усадку), хорошо обрабатываются резанием.

Деформируемые сплавы обладают удовлетворительной пластичностью, высокой коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием, большая часть сплавов может упрочняться термообработкой. Деформируемые сплавы в основном применяются для сварных и клепаных соединений элементов конструкций, испытывающих небольшие нагрузки, но требующих высокого сопротивления коррозии (емкости, баки, настилы).

Традиционная маркировка включает в себя буквенное обозначение сплава, порядковый номер сплава и буквенное обозначение состояния поставки (М — мягкий, Н — нагартованный, П — полунатравленный). Основные свойства и область применения некоторых сплавов приведены в табл. 2.3.

Сплавы на основе меди. Медные сплавы обладают высокими механическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии. Различают литейные и деформируемые сплавы.

По составу легирования различают латуни (ГОСТ 15527—2004) (основной легирующий компонент — цинк), бронзы (ГОСТ 493—79, ГОСТ 613—79) и медно-никелевые сплавы.

Традиционная маркировка имеет следующий вид. Латуни обозначаются буквой Л, бронзы — Бр. У латуни после буквы Л указываются буквенные обозначения легирующих компонентов, далее

Таблица 2.3. Свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Легирование	Свойства	Применение
Литейные			
Силумины			
АЛ2	Si	Хорошие литейные свойства, невысокая прочность	Малонагруженные детали
АЛ9			Фланцы, картеры, поршни
АЛ4			Блоки цилиндров
Медно-марганцевые			
АЛ7	Cu	Повышенная прочность, коррозионная стойкость во влажных средах	Кронштейны, арматура
АЛ8	Mg		Вилки, кронштейны
АЛ21	Mg, Cu		Блоки цилиндров
Марка сплава	Легирование	σ_b , МПа	δ , %
Деформируемые			
Дуралюмины			
Д1	Cu, Mg, Mn	320	14
Д16	Cu, Mg, Mn	400	11
АВ	Cu, Mg, Mn, Si	200	15
Авиаль			
В95	Cu, Mg, Mn, Zn, Cr	550	8
Высокопрочный сплав			
АК6	Cu, Mg, Mn, Si	300	12
АК8	Cu, Mg, Mn, Si	380	14
Ковочный сплав			
АК4-1	Cu, Mg, Si, Fe, Ni	280	13
Жаропрочный сплав			
Д20	Cu, Si, Fe, Ni	250	12

Примечание. Д — дуралюмин, А — технический алюминий (сплав алюминиевый), К — ковочный, В — высокопрочный, Л — литейный.

проставляется массовое процентное содержание меди, затем подряд — массовое процентное содержание легирующих компонентов, содержание цинка — остальное. Например: ЛМцЖ55-3-1 — латунь, медь — 55 %, марганец — 3 %, железо — 1 %, цинк — остальное. У литейной латуни иногда содержание меди не указывается, содержание компонента ставится сразу после его обозначения, например ЛЦ30А3 — латунь литейная, цинк — 30 %, алюминий — 3 %, остальное — медь. У бронзы после букв Бр указываются буквенные обозначения легирующих компонентов, далее подряд — массовое процентное содержание легирующих компонентов, содержание меди — остальное. Например: БрОЦС4-4-2,5 — бронза, олово — 4 %, цинк — 4 %, кремний — 2,5 %, остальное — медь. У литейной бронзы содержание компонента ставится сразу после ее обозначения, например БрО4Ц4С17 — бронза литейная, олово — 4 %, цинк — 4 %, кремний — 17 %, остальное — медь.

Область применения некоторых медных сплавов приведена в табл. 2.4.

Антифрикционные сплавы. Такие сплавы применяются для заливки подшипников скольжения. Они должны иметь низкий коэффициент трения, быть достаточно пластичными и прочными, но их прочность не должна превосходить прочность установленных в

Таблица 2.4. Область применения медных сплавов

Марка сплава	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	Применение
Латунь			
<i>Деформируемая</i>			
ЛАЖ60-1-1	450	8	Трубы, прутки
АЖМц59-1-1	450	10	Полосы, прутки, мелкие поковки
ЛС59-1	400	6	Мелкие поковки
Литейная			
ЛЦ40С	215	12	Втулки, сепараторы
ЛЦ40Мц5Ж	440	10	Винты, лопасти
ЛЦ30А3	300	12	Коррозионно-стойкие детали
Бронза			
<i>Деформируемая</i>			
БрОФ6,5-0,4	400	5	Арматура

Марка сплава	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	Применение
БрОЦ4-3	330	4	Пружины
БрОЦС4-4-2,5	350	2	Антифрикционные детали
Литейная			
БрОЗЦ12С5	200	8	Арматура
БрО5ЦНС5	175	4	Вкладыши подшипников
БрО4Ц4С17	150	5	Антифрикционные детали

подшипник валов. Применяются сплавы на основе олова или свинца (баббиты), меди, алюминия, цинка.

Баббиты обозначаются буквой Б, далее ставится цифра, показывающая процентное содержание олова, или буква, характеризующая специальный элемент, входящий в сплав. Например: Б83 — сплав содержит 83 % олова, БТ — сплав содержит теллур, БН — сплав содержит никель, БК2 — сплав содержит кальций. У сплавов Б83, Б89 основа — олово; у сплавов БН, БТ, Б6, БКА, БК2 — свинец. Область применения баббитов показана в табл. 2.5.

Для изготовления вкладышей подшипников, работающих при высоких давлениях (более 1 000 МПа), применяют свинцовую бронзу, например БрС30. Алюминиевые сплавы, легированные оловом и медью, — АОЗ-1, АО9-2, АО20-1, никелем — АН2,5. Цинковые сплавы, легированные алюминием и медью, — ЦАМ10-5, ЦАМ9,5-1,5.

Таблица 2.5. Области применения баббитов

Марка	Применение
Б83	Подшипники особо нагруженных машин
Б89	
БН	Подшипники средней нагруженности
Б16	
БТ	Подшипники для тракторных двигателей
Б6	Подшипники малой нагруженности
БКА	При нагрузке до 1 000 МПа
БК2	

2.1.3. Биметаллы

В условиях непрерывного удорожания производства легированной стали, цветных металлов и их сплавов большое значение приобретает применение биметаллов и многослойных покрытий. Биметалл — материал, состоящий из металла — основы и нанесенного на него одно- или многослойного покрытия. Биметаллы позволяют не только уменьшить расход дефицитных и дорогостоящих цветных сплавов, но и получить материалы с новыми, уникальными свойствами. Например, при изготовлении отвалов плугов используется трехслойная сталь «сталь 60 — сталь 15 — сталь 60» — износостойкий материал, позволяющий резко повысить стойкость отвала.

Рекомендации по применению некоторых биметаллов в машиностроении приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Области применения биметаллов в машиностроении

Вид материала	Марка материала	Применение
Сталь листовая трехслойная коррозионно-стойкая	Сталь 08Х18Н10Т — сталь 10 (08) — сталь 08Х18Н10Т	Детали почвообрабатывающих машин
	Сталь 12Х18Н10Т — сталь 10 (08) — сталь 12Х18Н10Т	
Сталь листовая трехслойная износостойкая	Сталь 60 — сталь 15 — сталь 60	Рабочие органы почвообрабатывающих машин (лемехи, отвалы, полевые доски), ножи бытовой техники
Трубы биметаллические	Сталь 10 — бронза	Подшипники скольжения
	БрОФ6,5-0,15	
Полосы биметаллические антифрикционные	Сталь 08 — бронза	Вкладыши коренных и шатунных шеек двигателей внутреннего сгорания
	БрОФ6,5-0,4	
Листы рифленные плакированного дуралюмина	Алюминий — дуралюмин Д1 — алюминий	Настилы полов сельскохозяйственной и строительной техники

2.1.4. Композиционные материалы с металлической матрицей

Композиционный материал — волокно или дисперсные частицы (наполнитель), соединенные в единую композицию с помощью вещества-связки (матрицы). Наполнитель должен быть не растворим в матрице.

В качестве матрицы часто применяют цветные металлы (Al, Mg, Ni и др.) или их сплавы. Наполнитель может быть зернистым (рис. 2.1, а) или волокнистым (рис. 2.1, б, в).

Волокнистые композиционные материалы. В волокнистых композиционных материалах (КМВ) наполнитель является упрочнителем. По механизму армирующего действия различают волокнистые композиционные материалы: *дискретные* с отношением длины волокна к его диаметру (L/d) $10 \dots 10^3$ (см. рис. 2.1, б); чем больше соотношение L/d , тем выше степень упрочнения, и с *непрерывным волокном*, $L/d \rightarrow \infty$ (см. рис. 2.1, в). Дискретные волокна расположены в матрице хаотично.

Укладка волокон наполнителя может быть слоистой непрерывной (рис. 2.1, г), тканевой (рис. 2.1, г) или объемной (рис. 2.1, е, ж).

От обычных сплавов КМВ отличаются высокими прочностными показателями, высокой удельной прочностью (отношение проч-

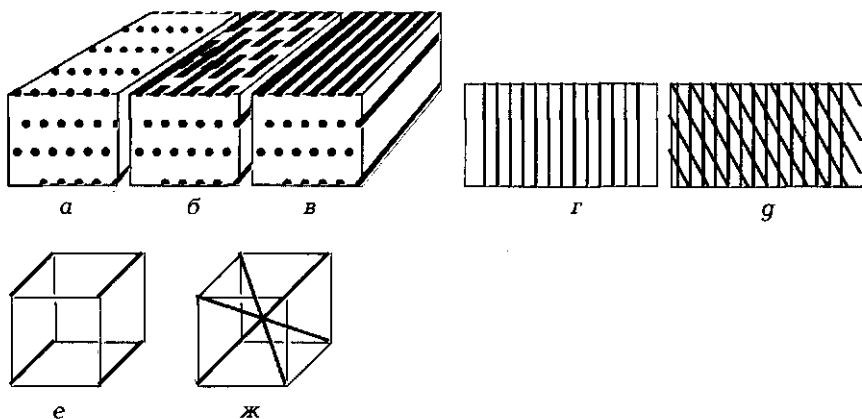


Рис. 2.1. Структура композиционных материалов с металлической матрицей:

а — зернистые; б — дискретно волокнистые; в — непрерывно волокнистые; г — с непрерывной укладкой волокон; г — с тканевой укладкой волокон; е, ж — с объемной укладкой волокон

Таблица 2.7. Механические свойства КМВ

Марка КМВ	σ_b , МПа	σ_{-1} , МПа	E , ГПа
Никель — вольфрам (ВКН-1)	700	150	—
Алюминий — углерод (ВКУ-1)	900	300	220
Бор — алюминий (ВКА-1А)	1 300	600	220
Бор — магний (ВКМ-1)	1 300	500	220
Алюминий — сталь (КАС-1А)	1 700	350	110

постных показателей к плотности) и пониженной склонностью к трещинообразованию. Прочность КМВ определяется свойствами волокон, матрица должна скреплять волокна и распределять напряжения между ними. При этом механические свойства КМВ вдоль волокон значительно выше, чем поперек; КМВ малопластичны. Скорость распространения трещин в КМВ мала, и практически исключается их внезапное хрупкое разрушение. Особенностью КМВ является малая скорость их разупрочнения во времени. Основным недостатком является низкое сопротивление межслойному сдвигу, оно значительно возрастает у КМВ с объемной укладкой.

Для алюминиевых и магниевых КМВ применяют волокна борные (предел прочности при растяжении $\sigma_b = 2\,500 \dots 3\,500$ МПа, модуль упругости $E = 38 \dots 420$ ГПа), углеродные ($\sigma_b = 1\,400 \dots 3\,500$ МПа, $E = 160 \dots 450$ ГПа), из карбидов кремния ($\sigma_b = 2\,500 \dots 3\,500$ МПа, $E = 450$ ГПа), карбидов, нитридов и оксидов тугоплавких металлов из высокопрочной стали. Для армирования титана и его сплавов применяют молибденовую проволоку, волокна сапфира, карбида кремния, борида титана. Для жаропрочных никелевых КМВ применяют волокна из вольфрамовой или молибденовой проволоки. Свойства некоторых КМВ приведены в табл. 2.7.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы. В отличие от КМВ в дисперсно-упрочненных композиционных материалах (КМД) матрица является основным материалом, несущим нагрузку. Дисперсные частички (наполнитель) тормозят движение дислокаций в матрице. Наиболее оптимальным вариантом является равномерное распределение частичек размером $(1 \dots 5) \cdot 10^{-8}$ м ($10 \dots 50$ нм) с расстоянием между ними $(1 \dots 5) \cdot 10^{-7}$ м ($100 \dots 500$ нм). КМД можно получить на основе практически всех используемых в технике металлов и сплавов.

Наиболее широко применяются КМД на основе алюминия — САП (спеченный алюминиевый порошок). В САП матрицей явля-

Таблица 2.8. Механические характеристики САП

Марка САП	Содержание Al_2O_3 , %	σ_s , МПа	δ , %	σ_{100} (длительная прочность при $T = 500^\circ C$), МПа
САП-1	6...9	300	8	45
САП-3	13...18	400	3	55

Таблица 2.9. КМД с матрицей на основе никеля

Марка КМД	Длительная прочность при $T = 1\ 200^\circ C$
ВДУ-1	$\sigma_{100} = 75$ МПа; $\sigma_{1\ 000} = 65$ МПа
ВД-3	$\sigma_{100} = 65$ МПа

ется алюминий, наполнителем — мелкие частички оксида алюминия Al_2O_3 (от 6 до 18 %). С увеличением содержания Al_2O_3 повышается предел прочности при растяжении и уменьшается относительное удлинение. Сравнение механических характеристик САП приведено в табл. 2.8. Плотность САП равна плотности алюминия.

В качестве жаропрочных применяются КМД с матрицей на основе никеля (γ -раствор Ni + 20 % Cr или Ni + 15 % Mo, или Ni + 20 % (Mo + Cr)) и наполнителем (2...3 %) из оксида тория или оксида гафния. Например, ВДУ-1: никель, упрочненный оксидом кремния; ВДУ-2: никель, упрочненный оксидом гафния; ВД-3: матрица — Ni + 20 % Cr, упрочнение — оксид тория. Показатели жаропрочности этих сплавов приведены в табл. 2.9.

Область применения композиционных материалов не ограничена. Они используются там, где необходимо сочетание высокой удельной прочности с высокой жесткостью, с пониженной склонностью к трещинообразованию или с высокой жаропрочностью, например элементы жесткости, панели в машиностроении, для облегчения кузовов, рессор, бамперов и т. д.

2.1.5. Конструкционные порошковые материалы

Порошковые материалы (ПМ) изготавливают путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров с последующим спеканием в вакууме или в защитной атмосфере при температуре $(0,75...0,8)T_{пл}$.

Различают пористые и компактные ПМ.

Пористые ПМ после окончательной обработки сохраняют 10...30 % остаточной пористости и используются в основном для изготовления антифрикционных деталей (подшипники, вкладыши, втулки) и фильтров. Антифрикционные детали могут работать без дополнительной смазки (за счет «выпотевания» масла или графита, находящихся в порах материала), легко прирабатываются, выдерживают значительные нагрузки, обладают хорошей износостойкостью. Антифрикционные детали изготавливают из железографита (1...7 % графита) или бронзографита (8...10 % олова и 2...4 % графита).

Металлическая основа железографитовых материалов имеет перлитную структуру, что обеспечивает хорошую износостойкость при высоких скоростях и нагрузках. Для улучшения прирабатываемости добавляют 0,8...1,0 % серы или 3,5...4,0 % сульфидов. Механические свойства антифрикционных материалов приведены далее.

Механические свойства антифрикционных материалов

Железографитовые материалы марок ЖГр1, ЖГр2 и ЖГр7:

- коэффициент трения со смазкой..... 0,07 ... 0,09
- наибольшая нагрузка, МПа..... 1 000 ... 1 500
- наибольшая рабочая температура, °С..... 200
- σ_b , МПа..... 180 ... 300
- НВ..... 60 ... 120

Бронзографитовые материалы марок БрОГр10-2 и БрОГр8-4:

- коэффициент трения:
 - ✓ без смазки 0,04 ... 0,09
 - ✓ со смазкой 0,05 ... 0,007
- наибольшая нагрузка, МПа..... 400 ... 500
- наибольшая рабочая температура, °С..... 250
- σ_b , МПа..... 30 ... 50
- НВ..... 25 ... 50

Порошковые материалы на основе железа и меди используют во фрикционных изделиях (тормозные диски, накладки и др.), которые должны иметь высокий коэффициент трения, высокую прочность, большую износостойкость. Для повышения коэффициента трения в ПМ вводят карбиды кремния, бора, тугоплавкие оксиды. Твердым смазочным компонентом служит графит или свинец. Коэффициент трения для ПМ на основе железа — 0,18...0,4 (сплав ФМК11), меди — 0,17...0,25 (сплав МК5).

Порошковые материалы широко применяют для изготовления фильтрующих элементов. Фильтры на основе никеля, железа, ти-

тана, алюминия, коррозионно-стойкой стали с пористостью 45... 50 % и размером пор $(2 \dots 20) \cdot 10^{-6}$ м (2... 20 мкм) используют для очистки жидкостей и газов.

Компактные ПМ (пористость 1...3 %) получают из порошков углеродистой и легированной стали, бронз, латуни, титановых и алюминиевых сплавов. В маркировке ПМ из стали добавляют букву С — сталь и букву П — порошковая, в конце маркировки указывают плотность стали в процентах. Например: СП10-1 — сталь порошковая 10, плотность 1 %; СП45Х3-2 — сталь порошковая, 0,45 % углерода, 3 % хрома, плотность 2 %. Механические свойства порошковых сталей зависят от плотности. При плотности более 3 % повышается порог хладноломкости, но уменьшаются временное сопротивление σ_b и ударная вязкость КСЧ. Поэтому порошковая сталь рекомендуется для изготовления сложных, относительно небольших деталей, несущих малую нагрузку.

Технологическая цепочка получения изделий из ПМ включает в себя следующие основные процессы: получение порошков; подготовка порошковой шихты; формообразование детали с применением давления и спекания. Наиболее распространенным способом формообразования является холодное прессование в закрытых пресс-формах с последующим спеканием. Давление прессования составляет 10...420 МПа. Высокая стоимость и стойкость пресс-форм определяет и область применения ПМ — крупносерийное и массовое производство.

2.2. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.2.1. Общие сведения

К неметаллическим материалам относятся полимерные материалы (органические или неорганические): пластмассы, композиционные материалы на неметаллической основе, каучуки и резины, клеи и герметики, лакокрасочные покрытия, стекло, керамика.

Полимерами называют вещества, макромолекулы которых состоят из многочисленных звеньев (мономеров) одинаковой структуры. Их молекулярная масса составляет $(5 \dots 10) \cdot 10^4$. Следовательно, свойства полимера определяются не только его химическим составом, но и структурой, и взаимным расположением макромолекул. По форме макромолекул различают полимеры линейные, разветвленные, плоские ленточные, плоские сетчатые, слоистые и пространственные (рис. 2.2, а).

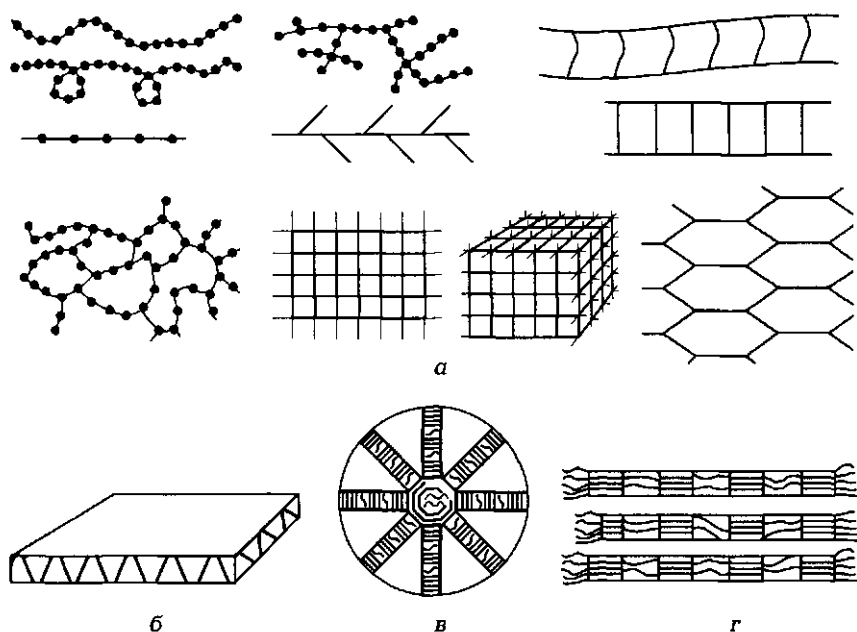


Рис. 2.2. Структура полимеров:

а — формы макромолекул; б — пластинчатый единичный кристалл; в — сферолит; г — микрофибрилла

Гибкие длинные макромолекулы обладают высокой прочностью вдоль молекулярной цепочки и слабыми молекулярными связями, что обеспечивает эластичность материала, способность размягчаться при нагреве и затвердевать при охлаждении (например, полиэтилен, полиамид). Разветвленные молекулы отличаются наличием боковых ответвлений, что препятствует их плотной упаковке (например, полиизобутилен). Плоские ленточные молекулы состоят из двух цепей, соединенных химическими связями. Они обладают повышенной теплостойкостью и большей жесткостью. Пространственные молекулы образуются при соединении молекул между собой прочными химическими связями. Образуется сетчатая структура различной густоты. Молекулы с редкой сеткой (сетчатые) теряют способность растворяться и плавиться, но обладают упругостью (мягкие резины). Густосетчатые молекулы (пространственные) отличаются твердостью и большой теплостойкостью. Эти полимеры используют в конструкционных неметаллических материалах.

Аморфные полимеры строятся из цепных молекул и собраны в пачки. Пачки являются структурными элементами и могут пере-

мещаться относительно соседних элементов. Некоторые аморфные полимеры состоят из цепных молекул, свернутых в клубки (глобулы). Такая структура дает низкие механические свойства (разрушение по границам глобул). При повышении температуры глобулы могут разворачиваться, что повышает механические свойства.

Кристаллические полимеры образуются только из достаточно гибких макромолекул с регулярной структурой. В этом случае возможно образование пространственных решеток внутри пачки. Гибкие пачки складываются в ленты, многократно поворачиваются на 180° и образуют пластины (рис. 2.2, б). Пластины, наслаиваясь друг на друга, образуют правильные кристаллы. При затруднении наложения образуются сферолиты (рис. 2.2, в), состоящие из лучей, с чередованием кристаллических и аморфных зон. Кристаллические участки состоят из микрофибрилл (рис. 2.2, г).

По отношению к нагреву полимеры разделяются на термопластичные и термореактивные. *Термопластичные* полимеры имеют линейную или разветвленную структуру молекул. При нагреве они размягчаются, могут плавиться, при охлаждении затвердевают. Этот процесс обратим. *Термореактивные* полимеры в начальной стадии образования имеют линейную структуру. При нагреве они размягчаются. Далее образуется пространственная структура, полимер получает термостабильное твердое состояние.

Особенности строения полимеров определяют их свойства. Высокая молекулярная масса приводит к невозможности перехода в газообразное состояние или к образованию низковязких жидкостей. Термостабильные полимеры не размягчаются. Полимеры могут находиться в трех стабильных состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

Стеклообразное — твердое аморфное состояние, движения звеньев и перемещения макромолекул нет. Высокоэластическое состояние характеризуется способностью материала к большим обратимым изменениям формы под действием незначительных нагрузок. Вязкотекучее состояние напоминает жидкое состояние с большой вязкостью.

Полимеры обладают одним неприятным свойством — они «стареют» (самопроизвольно и необратимо изменяются их механические свойства) под воздействием света, кислорода (озона), влаги, высокой температуры, длительного хранения. Процессы старения ускоряются под воздействием механических напряжений. Сущность старения заключена в сложной цепной реакции с образованием свободных радикалов (реже ионов), сопровождаемой деструктуризацией. Наиболее устойчивы к воздействию высоких атмосферных

температур и влаги полиэтилен, политетрафторэтилен, полиамидные волокна. Для замедления старения в полимеры добавляют стабилизаторы (органические вещества, антиоксиданты). Например, срок службы полиэтилена, стабилизированного сажей, увеличивается до 5 лет, поливинилхлорид имеет срок службы до 25 лет.

2.2.2. Пластмассы

Пластмассы — многокомпонентные искусственные материалы. Обязательным компонентом является связка, в качестве которой используются синтетические смолы, эфиры, целлюлоза. Некоторые пластмассы состоят только из одной связки (полиэтилен, фторопласты, органическое стекло и др.). Вторым компонентом является наполнитель (порошкообразные, волокнистые, сетчатые вещества органического или неорганического происхождения). Наполнители повышают механические свойства, снижают усадку при прессовании полуфабриката, придают материалу необходимые свойства. Для повышения эластичности и облегчения обработки в пластмассу добавляют пластификаторы (олеиновая кислота, стеарин, дибутилфторат). Исходная композиция может содержать отвердители (амины), катализаторы (пероксиды) процесса отверждения, красители.

По характеру связки различают *термопластичные* (термопласты) и *термореактивные* пластмассы.

По виду наполнителя различают пластмассы *порошковые* (карболиты) — с наполнителем в виде древесной муки, графита, талька; *волокнистые* — с наполнителем из очесов хлопка и льна (волокниты), стеклянных нитей (стекловолокниты), асбеста (асбоволокниты); *слоистые* — с листовым наполнителем: бумажные листы (гетинакс), хлопчатобумажные ткани, стеклоткани, асбестовые ткани (текстолит, стеклотекстолит, асботекстолит); *газонаполненные* — с воздушным наполнителем (пенопласты, поропласты).

Особенностями пластмасс являются малая плотность; низкая теплопроводность; большое тепловое расширение; хорошие электроизоляционные свойства; высокая химическая стойкость; хорошие технологические свойства.

Методы переработки пластмасс определяются их свойствами. Основными методами являются экструзия, литье, литьевое прессование, вакуумное и пневматическое формование, вальцевание, вспенивание, сварка, горячее напыление, строгание в листы, обработка на станках со снятием стружки.

Экструзия заключается в выдавливании расплава через калиброванное отверстие мундштука. Сечение отверстия определяет поперечную форму изделия. Данным методом получают стержни различного профиля, трубы, листы, пленки.

Прессование заключается в формообразовании изделия в закрытой полости (ручье) специальной оснастки — пресс-формы. Различают горячее и холодное прессование.

При *горячем* прессовании нагретую композицию (гранулы, ткани, пропитанные смолой) помещают в нагретую пресс-форму. При смыкании половинок пресс-формы композиция заполняет всю полость ручья. Изделие выдерживают в пресс-форме до затвердевания. Подогрев композиции и пресс-формы производят токами высокой частоты, паром, перегретой водой. Данным методом перерабатывают композиции на основе фенолоальдегидных смол, аминопласты и армированные полиэфирные пластики. Способ применяется для получения корпусных и мелких деталей.

При *холодном* прессовании композицию не нагревают. Прессование производят при давлении 14...120 МПа. После прессования заготовку нагревают до температуры 80...260 °С. Данным способом перерабатывают асфальтопечковые пластмассы и композиции на основе фенолоальдегидных смол. Способ применяется для получения неглубоких корпусных деталей. При *литьевом* прессовании композицию в расплавленном состоянии выдавливают в ручей пресс-формы, затем выдерживают до затвердевания. Способ позволяет получать сложные изделия (при наличии ребер, резьбы, выступов, выемок) из термореактивных смол и высоковязких термопластов. При прессовании *под давлением* композицию в расплавленном состоянии выдавливают в ручей пресс-формы, затем выдерживают под давлением до затвердевания. Способ позволяет получать еще более сложные по форме изделия (наличие ребер, резьбы, выступов, выемок и др.) из термореактивных смол и высоковязких термопластов.

Методом **штамповки** перерабатываются листовые материалы из термопластов (полистирол, полиамиды, фторопласты и др.).

Формообразование изделий способом **направленной вытяжки** производится силовым воздействием на нагретый лист, установленный между пуансоном и матрицей. При формообразовании способом **свободной вытяжки** пуансон отсутствует, а лист прижимается к матрице или воздействием на наружную сторону листа избыточным давлением, или воздействием на внутреннюю сторону листа разрежением.

Вспенивание применяется для получения ячеистых конструкций малой объемной массы. Для вспенивания применяют фенолоальдегидные, мочевиноальдегидные смолы, полистирол, поливинилхлорид, ацетат целлюлозы и каучуки. Метод заключается в введении в пластик газов (газообразующих наполнителей) и применяется для изделий, требующих хороших тепло- и звукоизоляционных свойств.

Сварка применяется для получения неразъемных соединений изделия из термопластов. Для сварки применяют горячий воздух (250...300 °С). Поверхности зачищают, выравнивают, обезжиривают и прижимают друг к другу под давлением 200...300 кПа. За счет взаимной диффузии происходит переплетение макромолекул.

Полимеры часто используются **для нанесения покрытий** на металл, дерево, бумагу, пластмассу в целях защиты от коррозии, эрозии и для украшений. Возможно нанесение на обрабатываемую поверхность жидкой композиции, которая высыхает при испарении растворителя. Часто покрытия наносят способом горячего распыления пластика, прошедшего через воздушно-ацетиленовое пламя.

Таблица 2.10. Области применения и способы переработки пластмасс

Пластмасса	Применение	Переработка
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) высокого давления	Пленки, трубы, изделия, работающие при обычных температурах	Литье под давлением, экструзия, пневмовакуумформирование, прессование, спекание, сварка
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) низкого давления	Пленки, трубы, антифрикционные и защитные покрытия	Литье под давлением, экструзия, вакуумформирование, прессование, спекание, сварка
Блок-сополимеры пропилена с этиленом (БСПЭ)	Трубы, фитинги, корпусные детали, панели	Литье под давлением, экструзия, прессование
Полистирол (АБС-пластики)	Тара, крупногабаритные корпусные детали	Литье под давлением, экструзия, прессование

Пластмасса	Применение	Переработка
Полиметилметакрилат (ПММА)	Остекление кабин, герметики	Литье под давлением, экструзия, прессование, сварка, склеивание
Фторопласты	Детали антифрикционного назначения, прокладочные материалы	Прессование, экструзия, литье под давлением
Полиамиды ПА66, 6, 610, 612, 11, 12	Детали, работающие под нагрузкой, корпуса, гибкие детали	Литье под давлением, экструзия
Полиформальдегид ПФ, СФ	Шестерни, втулки, антифрикционные детали	Литье под давлением, сварка, склеивание

Механическая обработка пластмасс в основном применяется для удаления литниковой системы, облоя, заусенцев, получения фасок и отверстий.

Рекомендации по применению пластмасс в машиностроении приведены в табл. 2.10.

2.2.3. Композиционные материалы с неметаллической матрицей

Определение композиционных материалов приведено в подразд. 2.1.4. В качестве матрицы часто применяют полимерные смолы (эпоксидная, фенолоформальдегидная, полиамидная и др.), углеродные и керамические материалы. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксиды, бориды, карбиды, нитриды и др.), металлическая проволока.

Свойства композитов зависят от состава композиции, сочетания компонентов, прочности связей между ними. Свойства матрицы определяют в основном прочность композита на сдвиг и сжатие, сопротивление усталостному износу. Свойства упрочнителя определяют в большей степени прочность и жесткость материала.

В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим составом, укладывают параллельно друг другу. Полу-

ченные слои собираются в пластины. При параллельной укладке свойства композита получаются анизотропными. При укладке волокон под углом друг к другу можно получить материалы с изотропными свойствами. Рассмотрим некоторые наиболее применяемые композиты.

Карбоволокниты (углепласты) представляют собой композиции, состоящие из полимерной матрицы и упрочнителя в виде углеродных волокон (карбоволокон). В качестве матрицы применяются полимеры (полимерные карбоволокниты), синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (коксованные карбоволокниты), пиролитический углерод (пироуглеродные карбоволокниты). Для удешевления производства в композит добавляют стекловолокно (карбостекловолокониты).

Карбоволокниты отличаются высоким статическим и динамическим сопротивлением усталости, могут работать в широком диапазоне положительных и отрицательных температур. Материал используется в кузовостроении, при изготовлении панелей, подшипников и др.

В **бороволокнитах** в качестве упрочнителя применяют борные волокна. Материал отличается высокой прочностью при сжатии, сдвиге, срезе, низкой ползучестью, высокой твердостью. Изделия из бороволокнитов применяются в авиастроении.

Органоволокниты представляют собой композицию из синтетической матрицы и синтетических волокон. Механические параметры компонентов близки, поэтому происходит взаимная диффузия компонентов и возможны химические реакции между ними, благодаря чему материалы имеют стабильные во времени механические свойства.

Таблица 2.11. Области применения и способы переработки композиционных материалов с неметаллической матрицей

Материал	Применение	Переработка
Сетчатые композиции полиэтилена с полиизобутиленом	Трубы среднего давления, шланги, пленки, уплотнения	Литье под давлением, экструзия, прессование
Композиции на основе винилпластов ПВХВ	Детали, работающие в условиях ударных нагрузок	Литье под давлением, прессование, вальцевание, каландрирование
Пресс-материалы на основе кремнийорганических смол	Детали, работающие при повышенных нагрузках	Прессование

Материал	Применение	Переработка
Текстолит	Зубчатые колеса, втулки, подшипники скольжения, вкладыши	Механическая обработка
Стеклотекстолит	Детали, работающие при повышенных механических и термических нагрузках	Механическая обработка

ческие свойства, хорошо работают при повышенной влажности и повышенных климатических температурах. Композиты применяют для изготовления корпусов машин, работающих в тропическом и субтропическом климате.

Рекомендации по применению композиционных материалов с неметаллической матрицей в машиностроении приведены в табл. 2.11.

2.2.4. Резиновые материалы

Резина — продукт специальной обработки (вулканизации) каучука. От других материалов резина отличается высокой эластичностью (относительное удлинение до 1 000 %).

Основой любой резины служит каучук натуральный (НК) или синтетический (СК). Для улучшения свойств каучуков в резину вносят специальные добавки.

Вулканизирующие вещества участвуют в образовании пространственно-сетчатой структуры вулканизата. Обычно применяют серу или селен.

В качестве **ускорителей процесса вулканизации** используют полисульфиды, оксиды свинца или магния.

Противостарители (антиоксиданты) замедляют процесс старения резины. Противостарители химического действия замедляют окисление каучука, физические противостарители (парафин, воск) образуют на внешней части изделия защитные пленки.

Мягчители (пластификаторы) облегчают переработку резиновой смеси, увеличивают эластичность каучука, повышают морозостойкость резины. Обычно применяют парафин, вазелин, стеариновую кислоту, битумы.

Наполнители по воздействию на каучук различают инертные и активные. Инертные наполнители (мел, тальк и др.) вводятся для удешевления резины. Активные наполнители (например, углеродистая сажа, оксид цинка) улучшают механические свойства резины.

Регенерат — продукт переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства — кроме уменьшения стоимости резины снижает склонность резины к «старению».

Антипирены снижают воспламеняемость и горючесть резины.

Фунгициды защищают резину от воздействия микроорганизмов, особенно в условиях тропиков.

Дезодоранты подавляют неприятный запах резины.

Красители и пигменты вводят для окраски резины.

Большинство каучуков — непредельные высокомолекулярные соединения с линейной или слабоветвистой структурой. Наличие в молекулах непредельных связей позволяет переводить макромолекулы в стабильное состояние.

В процессе вулканизации каучука (нагревания его с серой) происходит сшивание полиизопреновых цепей дисульфидными мостиками, в результате чего получается пространственная сетчатая структура. В зависимости от концентрации вводимой серы получают сетку с разной величиной ячейки. При 1...5 % серы структура мелкоячеистая, и резина получается высокоэластичной. С увеличением концентрации серы резина становится менее эластичной, повышается ее твердость. При 30 % серы получают твердый материал (эбонит).

Различают резины общего назначения и специальные.

Резины общего назначения получают вулканизацией натурального или синтетических (бутадиеновый — СКБ, бутадиенстирольный — СКС, изопреновый — СКИ) каучуков. Резины специального назначения разделяют на маслостойкие, теплостойкие, морозостойкие и т. п.

2.2.5. Клеи и герметики

Клеи и герметики относятся к пленкообразующим материалам. Клеи применяются для склеивания различных материалов. Герметики обеспечивают уплотнение и герметизацию швов, стыков и т. д. В состав этих материалов входят пленкообразующие вещества (термореактивные смолы, каучук), растворители (спирты,

бензин), *пластификаторы* (для устранения усадочных явлений при склеивании и для повышения эластичности пленки), *отвердители и катализаторы* (для перевода пленкообразующего вещества в термостабильное состояние), *наполнители* (для повышения прочности и других характеристик клеевого слоя).

Клеевые соединения, по сравнению с другими видами соединений, позволяют соединять различные материалы в различных сочетаниях, более стойки к коррозии, более технологичны при ремонте изделий, позволяют соединять тонкие изделия и т.д. Органическая природа многих клеев определяет их низкую длительную теплостойкость (до 350 °С). Клеи на основе кремнийорганических и неорганических полимеров имеют повышенную теплостойкость (до 1 000 °С).

Клеи классифицируют по ряду признаков. По введенному пленкообразующему веществу различают клеи смоляные и резиновые. По адгезионным свойствам различают клеи универсальные и специальные. По отношению к нагреву различают клеи обратимые (термопластичные) и необратимые (термостабильные). По условиям отверждения различают клеи горячего или холодного склеивания. По внешнему виду различают жидкие, пастообразные и пленочные клеи. По назначению различают конструкционные силовые и несиловые клеи.

Смоляные клеи изготавливают на основе термореактивных смол, которые отверждаются в присутствии катализатора и отвердителей. Клеи холодного склеивания, как правило, обладают малой прочностью. Клеи горячего склеивания, за счет более полного отверждения, имеют высокую прочность и теплостойкость.

Клеи на основе модифицированных фенолоформальдегидных смол применяют для склеивания металлических силовых элементов, деталей из стеклопластика и др. *Фенолкаучуковые клеи* имеют высокую адгезию к металлам, достаточно эластичны и теплостойки, водостойки, обеспечивают прочное соединение при неравномерном отрыве. Выпускаются марки ВК-32-200, ВК-3, ВК-4, ВК-13. *Фенолкремнийорганические клеи* содержат в качестве наполнителя асбест, алюминиевый порошок. Клеи термостойки, водостойки, обладают высокой длительной прочностью. Выпускаются марки ВК-18, ВК-18М (теплостойкость до 600 °С). *Клеи на основе эпоксидных смол* затвердевают только в присутствии отвердителя (используют соотношение смолы и отвердителя от 10:1 до 10:3). Они являются силовыми конструкционными клеями, обладают высокой прочностью пленки, хорошей адгезией к металлам, водостой-

ки, маслобензостойки, но имеют низкий предел прочности на изгиб и низкую теплостойкость. При увеличении добавки отвердителя уменьшается время отверждения (от 24 до 1 часа). Для повышения изгибной прочности в композицию добавляют пластификатор и волокнистые наполнители. К клеям холодного отверждения относят композиции с маркировкой ЭД, Л-4, ВК-9, КЛН-1, ЭПО. К клеям горячего отверждения относят ВК-32ЭМ, К-153, ФЛ-4С. Эпоксидно-кремниевые композиции ТКМ-75, Т-73 применяются для приклеивания режущей части инструментов. Клей УП-5-207М обладает высокой влагостойкостью, стоек к смене температур, вибрациям и старению. В состав композиции *полиуретановых* клеев холодного и горячего отверждения входят полиэфир, полиизоцианаты и цементный наполнитель. При смешивании компонентов происходит химическая реакция, в результате которой клей затвердевает. Эти клеи обладают универсальной адгезией, хорошей вибростойкостью, прочностью, маслобензостойкостью, но *высокотоксичны*. Выпускаются композиции ПУ-2, ВК-5, ВК-11. Клеи на основе *кремнийорганических соединений* обладают высокой теплостойкостью, маслобензостойки, не вызывают коррозию черных сплавов. Применяются для склеивания легированных сталей, титановых сплавов, неорганических материалов, стеклопластиков и асбопластиков. Выпускаются композиции ВК-2, ВК-8, ВК-15.

Резиновые клеи предназначены для склеивания резины с резиной, резины с металлами (стеклом). Они представляют собой растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях. Многие из них требуют горячей вулканизации (140...150 °С). Для увеличения адгезии в состав композиции вводят синтетические смолы (клей 88НП). Для повышения хладостойкости и теплостойкости (от -60 до +300 °С) в композицию вводят кремнийорганические смолы (КТ-15, КТ-30, МАС-1В).

Неорганические клеи — высокотемпературные клеи. Выпускаются в виде концентрированных водных растворов, твердых порошков (после нанесения композиции заготовки нагревают, композиция плавится, потом затвердевает), дисперсных растворов. **Фосфатные клеи** — раствор фосфатов с инертным или активным наполнителем. Выпускаются композиции АХФС, АФС. Алюмохромофосфатная связка (АХФС) имеет температуру отверждения 20...250 °С, $\sigma_b = 3...10$ МПа, $\tau_{сд} = 0,9...1,4$ МПа, огнеупорность 1000...1800 °С; водо- и кислотостойка, применяется для склеивания различных металлов. Алюмофосфатная связка (АФС) в качестве наполнителя содержит $ZrO_2 + Ti$; $\sigma_{сж}$ до 250 МПа.

2.2.6. Лакокрасочные материалы

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) применяются с целью нанесения на наружные поверхности деталей защитных или декоративных покрытий. Качественные покрытия наносятся на предварительно обработанные поверхности: шлифовка поверхности до получения шероховатости не более $Rz\ 0,6 \dots 1,2$ мкм, удаление с поверхности жировых, масляных и оксидных пленок, нанесение на поверхности специальных грунтовок. Различают лакокрасочные материалы прозрачные (лак), кроющие (эмаль) и подготовительные (грунтовка).

Лаки состоят из природной или синтетической основы, пластификаторов и красителей. Эмали выполняются на природной или синтетической основе с добавками пластификаторов, красителей, пленкообразователей, антипенных, диспергирующих, кроющих и других добавок. Покрытия наносятся кистью, распылением, окунанием и другими способами.

В машиностроении применяются ЛКМ на канифольной (КФ), битумной (БТ), глифталевой (ГФ), пентафталевой (ПФ), алкидно-стирольной (МС), эпоксидной (ЭП), алкидноуретановой (УР), кремнийорганической (КО) и полимерной (ХВ, ХС, АС, ВЛ) основах.

2.2.7. Древесные материалы

Древесные материалы относительно легко поддаются переработке, хорошо сопротивляются раскалыванию, сжатию, изнашиванию. Наиболее широко используется сосна, ель, лиственница, дуб и береза. Достоинства сосны — легкость, достаточно высокая прочность, хорошая гнилоустойчивость. Ель обладает меньшей прочностью, меньшей смолистостью, хуже обрабатывается резанием. Береза — однородная по строению, прочная, хорошо обрабатываемая и более дешевая древесина. К недостатку березы относится деформирование под влиянием переменной влажности воздуха. Дуб — твердая и прочная древесина, применяется для изготовления ответственных элементов конструкций. Прочность лиственницы на 30 % выше, чем сосны, эта древесина стойка к гниению.

К древесным материалам относятся пиломатериалы (доски, брусья, бруски), фанера, древесные плиты.

Доски выпускаются толщиной 16 мм и более. Различают доски необрезные (после распиливания бревен), полуобрезные (одна из

кромки обрезаны), обрезные (обрезаны обе кромки). *Брус* — пиломатериалы квадратного или прямоугольного сечения (100... 100 мм и более). По числу опиленных сторон различают брус двух-, трех- и четырехкантные.

Бруски — обрезной пиломатериал толщиной до 100 мм и шириной не более двойной толщины.

Фанера — слоистая клееная древесина, состоящая из трех, пяти и более слоев лущеного березового или соснового шпона, расположенных перпендикулярно друг другу. Фанера легко гнется, не коробится, выпускается листами толщиной от 1,5 до 18 мм, размеры листа 1 220 (2 440) × 725 (1 525) мм. Слои шпона склеиваются синтетическими смолами. Бакелитизированная фанера имеет повышенную прочность, водостойкость и атмосферостойкость.

Древесные плиты обладают высокой прочностью и формоустойчивостью. Различают плиты столярные, фанерные, древесностружечные, древесноволокнистые.

Столярные плиты получают склеиванием узких реек в щиты, выполняются из сосны, ели, березы. Выпускаются плиты размерами (1 800... 2 500) × (1 220... 1 525) × (16... 50) мм.

Фанерные плиты отличаются от фанеры большей толщиной (15, 20, 25, 30, 45 мм).

Древесностружечные плиты (ДСП) — композиционный материал. Основа — синтетические смолы, наполнитель — отходы деревообрабатывающих предприятий (стружка). По прочности приближаются к прочности древесины хвойных пород, тяжело режутся, но хорошо склеиваются. Изготавливают однослойные, трехслойные, покрытые строганым шпоном, с декоративным синтетическим покрытием. Марки: ПС — плоского прессования, средней плотности; ПТ — плоского прессования, тяжелые; далее в маркировке указывается количество слоев.

Древесноволокнистые плиты (ДВП) аналогичны ДСП, но в качестве наполнителя используются древесные или растительные волокна. Обладают большей прочностью. Плиты изготавливают нескольких марок: М — мягкие, ПТ — полутвердые, Т — твердые, СТ — сверхтвердые; могут выпускаться с декоративным или водо-защитным покрытием, звукопоглощающие.

2.2.8. Прокладочные материалы

Прокладочные материалы применяются для герметизации соединений корпусных или иных деталей (особенно при высоких дав-

лениях и температурах внутри герметизируемой полости), для теплоизоляции и электроизоляции разъемных частей.

В качестве прокладочных материалов используют естественные, синтетические или композиционные материалы.

Естественные материалы — кора пробкового дерева, асбест, войлок и отоженная медь. Кора пробкового дерева применяется при небольших значениях давления и температуры. Основное ее достоинство — маслобензостойкость. Но кора пробкового дерева — дефицитный материал, поэтому ее применение ограничено. Часто применяют пробковую крошку, связанную синтетическим клеящим составом. Асбест обладает прочностью, эластичностью, диэлектрическими свойствами, устойчив к температуре до 1 500 °С. Войлок — плотный шерстяной материал. Войлочные прокладки предотвращают попадание в соединения посторонних веществ, задерживают смазочные масла, смягчают удары и вибрации, являются хорошим шумоизолятором. Красную отоженную медь применяют при высоких температурах и давлениях.

Синтетические материалы — маслобензостойкая резина, различные пластмассы — обычно хорошие диэлектрики, но имеют низкую морозостойкость, теплостойкость, малый срок службы. Применяются в неответственных соединениях или как матрица композиционных материалов.

Композиционные материалы — целлюлозосодержащие материалы или композиция синтетический материал — упрочнитель. Целлюлозосодержащие материалы (бумага, плотный картон) применяются в качестве тонких прокладок в узлах, не подвергаемых воздействию влаги. Из бумаги, обработанной хлоридом цинка, касторовым маслом и глицерином, получают фибру. Фибра — прочный и долговечный диэлектрик, стойкий к маслу и воде. Из композиционных материалов чаще всего применяют композиции на основе маслобензостойкой резины. В качестве наполнителя используется распушенный асбест, графитный порошок, стальная фольга, стальная проволока или их сочетания. Композиционные прокладочные материалы наиболее универсальны, относительно дешевы, имеют большую долговечность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как называется сплав железо — углерод с содержанием углерода менее 2,14 %?
2. Расшифруйте маркировку следующих сплавов: сталь 12ХНЗА, сталь ШХ15, сталь 12ХНЗА, ВЧ 70-2, СЧ 15.

3. Расшифруйте маркировку следующих сплавов: ЛЦ30А3, Бр04Ц4С17.
4. Что это за сплавы: АЛ21, ВТ5-1, Д16, Б83?
5. Что такое волокнистые композиционные материалы?
6. Чем термопластичные пластмассы отличаются от термореактивных?
7. Опишите основные методы переработки пластмасс.
8. Что дает вулканизация каучуков?
9. Что такое композиционные прокладочные материалы?

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1.1. Общие сведения

Для изготовления электрических машин, аппаратов и приборов, для сооружения электрических установок и монтажа электрических линий используют как конструкционные так и специальные материалы, называемые *электротехническими*. Электротехнические материалы подразделяются на проводниковые, полупроводниковые, электроизоляционные и магнитные. Проводниковые материалы подразделяются на две основные группы: материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления.

По агрегатному состоянию проводниковые материалы подразделяются на три группы: газообразные, жидкие и твердые.

К *газообразным проводникам* относятся газы и пары, включая также парообразное состояние металлов. У газообразных проводников расстояние между молекулами и ионами очень большое из-за их разреженности. В результате вероятность столкновения между ними очень маленькая, поэтому их электропроводность в нормальных условиях невысока. Атмосферный воздух, который является смесью различных газов, в электротехнике считается хорошим изолятором.

Жидкими проводниками считаются расплавленные металлы, сплавы и электролиты. В качестве жидкого металлического проводника (при комнатной температуре) может быть использована только ртуть, температура плавления которой -39°C . Температуру плавления, близкую к комнатной ($29,8^{\circ}\text{C}$), имеет еще галлий. Другие металлы могут использоваться как жидкие проводники только при повышенных температурах, превышающих их точку плавления. По причине сочетания большой теплопроводности и теплоемкости жидкие металлы используются в качестве теплоносителей (например, в ядерных реакторах), как рабочее вещество магнитогидродинамических генераторов (МГД).

Магнитогидродинамический генератор — энергетическая установка, в которой энергия жидкой или газообразной электропроводящей среды, движущейся в магнитном поле, преобразуется непосредственно в электрическую энергию.

Твердые проводниковые материалы — это металлы, сплавы и неметаллические проводящие материалы. Они наиболее широко используются в качестве электротехнических материалов. Для них характерна электронная проводимость.

По составу все проводниковые материалы подразделяются на металлы, сплавы металлов и неметаллические проводящие материалы.

По свойствам и техническому назначению каждая из этих групп подразделяются на подгруппы.

Металлы подразделяются на пять подгрупп.

1. **Металлы с высокой удельной электропроводимостью.** К ним относятся медь и алюминий. У меди $\rho = 0,017$ мкОм·м, у алюминия $\rho = 0,028$ мкОм·м. Металлы с большой электропроводимостью используются для изготовления проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов, а также для проводников в интегральных микросхемах.

2. **Сверхпроводники.** Это металлы и сплавы, электрическое сопротивление которых при температурах, близких к абсолютному нулю, становится практически нулевым. Сверхпроводимость имеют 26 металлов, таких как олово, алюминий, ртуть, вольфрам, ванадий и др. Наиболее высокая температура перехода в сверхпроводящее состояние у ниобия — 9,4 К.

3. **Благородные металлы.** К ним относятся золото, серебро, платина и палладий. Эта группа металлов с очень высокой химической стойкостью. Они применяются в качестве материалов в средах с высокой химической агрессивностью и для коррозионно-стойких покрытий.

4. **Тугоплавкие металлы.** Для них характерна высокая температура плавления, превышающая 1 700 °С. К тугоплавким металлам относятся вольфрам, молибден, хром, тантал и др. Применяют эти металлы в качестве осветительных элементов в лампах накаливания и электродов, работающих в вакууме или защитной среде.

5. **Магнитные металлы.** К ним относятся железо, никель и кобальт, имеющие значительные магнитные свойства. Для магнитных металлов среднее значение температуры плавления 1 500 °С.

Сплавы металлов подразделяются на четыре подгруппы.

1. **Сплавы с высокой проводимостью.** К этой группе проводниковых материалов относятся проводники с удельным электриче-

ским сопротивлением в нормальных условиях не более $0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. В основном это сплавы на основе меди и алюминия. По сравнению с чистыми металлами они обладают повышенной механической прочностью, коррозионной и износостойкостью.

2. *Сплавы с высоким сопротивлением.* Удельное электросопротивление этих сплавов при комнатной температуре не менее $0,3 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. К ним относятся: манганин (86 % Cu, 12 % Mn, 2 % Ni), константан (59 % Cu, 40 % Ni, 1 % Mn), нихромы. Сплавы с высоким сопротивлением используются в электронной промышленности для изготовления металлопленочных резисторов МЛТ, электронагревательных элементов приборов.

3. *Прецизионные сплавы.* Это сплавы с особыми физико-механическими свойствами с точным химическим составом. Прецизионные сплавы в зависимости от их свойств можно подразделить на ряд групп: магнитно-мягкие, магнитно-твердые, сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКАР), сплавы с заданными свойствами упругости, сверхпроводящие, термобиметаллы.

4. *Припои.* Это низкотемпературные сплавы, используемые для пайки металлов или сплавов, имеющих температуру плавления выше, чем температура плавления припоя. Припои классифицируются на мягкие и твердые припои. У мягких припоев температура плавления ниже 300°C . В их состав входит от 10 (ПОС-10) до 90 % (ПОС-90) олова, остальное — свинец. В настоящее время в мировой электронной промышленности для коммерческого использования пайка электронных компонентов производится припоями, не содержащими свинца, в соответствии с директивой ROHS 2011/65/EU. Такие припои, как правило, дороже свинцовых. В электронной промышленности широко используется трехкомпонентный сплав олова, серебра и меди (SnAgCu) с температурой плавления около 220°C . В припое Sn42Bi58 вместо свинца используется висмут (его содержание в сплаве — 58 %). Висмут придает этому припою легкоплавкость (температура плавления $133...140^\circ\text{C}$), но ухудшает смачиваемость. Твердыми припоями, имеющими температуру плавления более 300°C , являются медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (ПСр) припои.

У **неметаллических твердых проводников** выделяют три подгруппы.

1. **Углеродистые материалы.** Это материалы, содержащие элементы, в состав которых входит углерод в различных формах (природный графит, уголь, сажа, пироуглерод, стеклоуглерод). На основе этих материалов изготавливаются щетки электрических машин,

резисторы, токоъемные вставки для токоприемников электроов, электроды для прожекторов и дуговых электрических печей.

2. Композиционные проводящие материалы. Это искусственно созданные материалы с механическим наполнителем в виде мелкодисперсных порошков из металла и их соединений из органических или неорганических соединителей. Проводящими свойствами может обладать как сам соединитель (например, матрица углеродная), так и наполнитель (например, мелкодисперсные порошки металлов).

3. Токопроводящая керамика. Токопроводящие керамические материалы состоят из прессованного и обожженного порошка оксидов, карбидов, нитридов, силицидов, боридов металлов или неметаллов. Большинству керамик требуется предварительный подогрев, вследствие того, что проводимость многих порошков начинается при высоких температурах. Для этого керамику легируют электропроводящими добавками, пропитывают металлами, а для повышения термостойкости снижают пористость и покрывают диэлектрическими оксидами, например, двуокисью кремния. Такие материалы используются в качестве токопроводящих элементов, контактных и резистивных слоев.

К важнейшим параметрам, характеризующим физические свойства проводниковых материалов, относятся: удельное сопротивление ρ (или обратная ему величина — удельная проводимость γ); температурный коэффициент удельного сопротивления TK_ρ или α_ρ ; коэффициент теплопроводности λ_t ; удельная теплоемкость C ; удельная теплота плавления l_t ; температурный коэффициент линейного расширения $TK_{\lambda, \rho}$; работа выхода электронов из металла A ; контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила e_t (термоЭДС).

Основными механическими свойствами для металлов являются предел прочности при растяжении σ_p и относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$.

Теплоемкость (C) физического тела — величина, равная количеству тепловой энергии, поглощаемой этим телом при нагреве его на 1°C без изменения его фазового состояния. Теплоемкость измеряется в [Дж/К]. Теплоемкость металлических материалов растет с повышением температуры. Величина теплоемкости определяется при бесконечно малом изменении его состояния:

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

Отношение теплоемкости C к массе тела m называется *удельной теплоемкостью* (c): $c = C/m$. Удельная теплоемкость измеряется в [Дж/(кг·К)].

Для тугоплавких материалов характерны низкие значения удельной теплоемкости. Так, для вольфрама $c = 238$ Дж/(кг·К), для молибдена $c = 264$ Дж/(кг·К). Для легкоплавких материалов, напротив, характерны большие значения удельной теплоемкости: например, у алюминия $c = 922$ Дж/(кг·К), у магния $c = 1\,040$ Дж/(кг·К). У металлических сплавов удельная теплоемкость находится в пределах 300...2000 Дж/(кг·К).

Теплопроводность — перенос тепловой энергии Q в неравномерно нагретой среде в результате теплового движения и взаимодействия составляющих ее частиц. Перенос теплоты в любой среде или каком-либо теле происходит от более горячих частей к холодным. В результате переноса теплоты происходит выравнивание частей температуры среды или тела. В металлах перенос тепловой энергии выполняется электронами проводимости. В единице объема металла достаточно свободных электронов, по этой причине теплопроводность металлов значительно больше, чем теплопроводность диэлектриков. Чем чище металлы, тем выше их теплопроводность. С увеличением примесей их теплопроводность уменьшается.

Процесс переноса теплоты описывается законом Фурье:

$$q = \frac{dQ}{dSdt} = -\lambda_t \text{grad} T,$$

где q — плотность теплового потока, т.е. количество теплоты, проходящей вдоль координаты x через единицу площади поперечного сечения за единицу времени, Дж/(м²·с); λ_t — коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м); $\text{grad} T$ — градиент температуры вдоль координаты x , К/м, $\text{grad} T = dt/dx$.

Теплопроводность металлов очень важна при использовании в промышленности. Из металлов и сплавов, обладающих высокой теплопроводностью, изготавливают детали машин, которые при работе поглощают или отдают теплоту. Металлы и сплавы с низкой теплопроводностью для полного прогрева нуждаются в медленном и длительном нагревании. Быстрый нагрев и быстрое охлаждение таких металлических материалов может вызвать образование трещин. Это необходимо учитывать при термической обработке, горячей обработке давлением, литье в металлические формы и т.д.

Теплотой фазового перехода называется теплота, поглощаемая твердым кристаллическим телом при переходе его из одной фазы в другую.

Теплота плавления — теплота, поглощаемая твердым кристаллическим телом при переходе его из твердого состояния в жидкое. Температура, при которой происходит плавление (при постоянном давлении), называется температурой плавления и обозначается $T_{пл}$.

Удельная теплота плавления — количество теплоты, которое нужно подвести к единице массы твердого кристаллического тела при температуре $T_{пл}$ для его перевода в жидкое состояние ($r_{пл}$); измеряют в [МДж/кг] или в [кДж/кг]. Сплавы металлов не имеют температуры плавления/отвердевания и совершают переход в некотором диапазоне температур (температура появления жидкой фазы называется *точкой солидуса*, температура полного плавления — *точкой ликвидуса*). Поскольку точно измерить температуру плавления такого рода веществ нельзя, применяют специальные методы (ГОСТ 20287—91 «Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания» и ASTM D 97). Некоторые смеси (эвтектического состава) обладают определенной температурой плавления, как чистые вещества. Величины температур и удельной теплоты плавления для ряда металлов приведены в табл. 3.1.

Необходимо знать температуры плавления металлов и сплавов в металлургии, в литейном производстве, при горячей обработке металлов давлением, при сварке, пайке и других процессах, сопровождающихся нагреванием металлических материалов.

Таблица 3.1. Характеристики проводниковых материалов

Металл	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Удельная теплота плавления q , кДж/кг	Удельная теплота плавления c , Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Алюминий	660	4,2	0,92	237
Вольфрам	3 420	5	0,15	174
Железо	1539	6	0,46	80
Литая сталь	1 300 ... 1 500	1 ... 4	0,50	47
Медь	1 084,5	4,3	0,4	401
Никель	1 455	6,5	0,5	91
Нихром	≈ 1 400	0,1	0,45	12
Серебро	961,9	3,7	0,25	429

Температурный коэффициент линейного расширения проводников (α_l) показывает относительное изменение линейных размеров проводника, в частности его длины в зависимости от температуры, K^{-1} :

$$\alpha_l = \frac{dl}{l} dT.$$

Линейное расширение проводов необходимо учитывать в тех случаях, когда проводники имеют большую протяженность (например, в контактной подвеске электрифицированных железных дорог). Температурный коэффициент удлинения контактного провода в среднем составляет $37 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Это значит, что при нагревании 1 км контактного провода на $1^\circ C$ его длина увеличивается на 37 мм, а при нагревании на $100^\circ C$ удлинение составит 3 700 мм = 3,7 м.

Грузовые компенсаторы не смогут компенсировать такого удлинения. Регулировка контактной сети при этом нарушится, стрелы провеса увеличатся, и условия нормального токосъема выполняться не будут. В этих условиях невозможно обеспечить высокую скорость движения поездов, возникнет реальная угроза поломки токоприемников.

Работа выхода электрона из металла — это работа по преодолению потенциального барьера на границе металл—вакуум. Чтобы электрон мог вылететь из металла, он должен обладать определенной энергией, достаточной для того, чтобы преодолеть силы притяжения положительных зарядов, находящихся в металле, и силы отталкивания со стороны ранее вылетевших из металла электронов. Эта энергия обозначается буквой A и называется *работой выхода электрона из металла*. Работа выхода определяется по формуле

$$A = e\phi,$$

где e — заряд электрона, K ; ϕ — потенциал выхода, V .

Можно считать, что весь объем металла для электронов проводимости представляет собой потенциальную яму с плоским дном, глубина которой равна работе выхода. Работа выхода выражается в электрон-вольтах (эВ).

Если сообщить электронам в металле энергию, достаточную для преодоления работы выхода, то часть электронов может покинуть металл. Это явление испускания металлом электронов называется *электронной эмиссией*. Для получения свободных электро-

нов в электронных приборах имеется специальный металлический электрод — катод.

3.1.2. Металлы с высокой удельной проводимостью

Медь. Достоинствами меди, обеспечивающими ее широкое применение в качестве проводникового материала, являются:

- малое удельное сопротивление (из всех металлов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);
- достаточно высокая механическая прочность;
- удовлетворительная в большинстве случаев стойкость к коррозии. Даже в условиях повышенной влажности медь окисляется на воздухе значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах;
- хорошая обрабатываемость: медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра;
- относительная легкость пайки и сварки.

В России в качестве проводникового материала используется медь марок М1 и М0, которые отличаются степенью чистоты меди. Медь марки М1 содержит 99,9 % Cu, присутствие в меди кислорода ухудшает ее механические свойства, поэтому содержание его строго регламентировано. Например, для марки М1 содержание кислорода должно быть не более 0,08 % в общем количестве примесей (0,3 %). Медь марки М0 содержит не более 0,05 % примесей и обладает лучшими механическими свойствами по сравнению с медью марки М1. В частности, она хорошо обрабатывается давлением. В ней содержится не более 0,02 % кислорода. Из меди марки М0 может быть изготовлена тонкая проволока.

Если медь подвергать отжигу, т. е. нагреву до нескольких сотен градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая (отожженная) медь (ММ), которая сравнительно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение при разрыве, и более высокую удельную проводимость. Электропроводность меди марки ММ на 3...5 % больше, чем у меди марки МТ. Отжиг меди производят в специальных печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления. Изменение механических свойств при отжиге оказывается значительно более рез-

ким, чем изменение удельного сопротивления. Отожженная медь служит электротехническим стандартом.

Мягкую медь применяют главным образом в качестве токопроводящих жил кабелей, монтажных и обмоточных проводов. Ленточная медь широко используется для экранирования кабелей связи, радиочастотных кабелей и электротехнических аппаратов. Если требуется защитить поверхность меди от окисления, то ее лудят или покрывают никелем, серебром, а иногда и золотом.

Из специальных электровакуумных сортов меди изготавливают детали клистронов, магнетронов, аноды мощных генераторных ламп, выводы энергии приборов СВЧ, некоторые типы волноводов и резонаторов. Кроме того, медь используют для изготовления фольгированного гетинакса и применяют в микроэлектронике в виде осажденных на подложке пленок, играющих роль проводящих соединений между функциональными элементами схемы.

Несмотря на большой коэффициент линейного расширения по сравнению с коэффициентом расширения стекол медь применяют для спаев со стеклами, поскольку она обладает низким пределом текучести, пластичностью и высокой теплопроводностью. Для впаивания в стекла медному электроду придают специальную форму в виде тонкого рантика, благодаря чему такие спаи называют рантовыми.

Алюминий. Алюминий — второй по значению после меди проводниковый материал с высокой электро- и теплопроводностью. По электропроводности он занимает третье место после серебра и меди. Алюминий — самый распространенный в природе металл, его содержание в земной коре составляет не менее 8 %, поэтому алюминий дешевле и более доступен, чем медь. По практическому использованию занимает второе место (после железа). Удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше удельного сопротивления меди, но алюминий в 3,5 раза легче меди. Благодаря малой плотности обеспечивается большая проводимость на единицу массы, т.е. при одинаковом сопротивлении и одинаковой длине алюминиевые провода в 2 раза легче медных, несмотря на большее поперечное сечение. Практически это означает, что диаметр алюминиевого провода будет примерно в 1,3 раза больше медного, поэтому замена меди на алюминий не всегда возможна.

В настоящее время алюминий не только заменил медь в воздушных линиях электропередачи, но внедряется и в производство изолированных кабельных изделий. Его применяют для изготовления токопроводящих жил обмоточных, монтажных и установочных проводов. Изготавливаются и силовые трансформаторы с алюми-

ниевыми обмотками. Многопроволочные алюминиевые провода применяют в качестве несущих и вспомогательных проводов контактной сети. В линиях электропередачи широко применяется ста- леалюминевый провод марки АС, представляющий собой сердеч- ник, свитый из стальных оцинкованных жил и обвитый снаружи алюминиевой проволокой. В проводах такого типа механическая прочность определяется главным образом стальным сердечником, а электрическая проводимость — алюминием.

Пленки алюминия широко используют в интегральных микро- схемах в качестве контактов и межсоединений. Последние обеспе- чивают связь между отдельными элементами схемы и внешние присоединения. Нанесение пленок на кремниевые пластинки обычно производят методом испарения и конденсации в вакууме. Требуемый рисунок межсоединений создается с помощью фото- литографии. *Достоинства* алюминия как контактного материала состоят в том, что этот материал легко напыляется, обладает хоро- шей адгезией к кремнию и пленочной изоляции из SiO_2 , широко используемой в полупроводниковых интегральных схемах, обе- спечивает хорошее разрешение при фотолитографии. Алюминий образует хорошие омические контакты с кремнием.

Недостатком алюминия является значительная подвержен- ность электромиграции, что приводит к увеличению сопротивле- ния или даже разрыву межсоединения; у алюминия низкая меха- ническая прочность. Отожженный алюминий в 3 раза менее про- чен на разрыв, чем отожженная медь.

3.1.3. Сверхпроводники

Сверхпроводимость — это протекание электрического тока через проводник без сопротивления, без потерь (в первую оче- редь без выделения теплоты). У многих металлов и сплавов при очень низких температурах, близких к абсолютному нулю (-273°C), наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления, прак- тически до нулевого сопротивления, не поддающегося измере- нию. Впервые это явление открыл в 1911 г. голландский ученый Г.Каммерлинг-Оннес. Измеряя сопротивление замороженного ртутного кольца в зависимости от понижаемой температуры, он обнаружил, что при охлаждении кольца до температуры 4,2 К со- противление его внезапно, резким скачком, падает практически до нуля. Этот эффект практически полного исчезновения электри- ческого сопротивления, т.е. появление практически бесконечной

удельной проводимости материала, был назван **сверхпроводимостью**, а температура T_C , при охлаждении до которой совершается переход вещества в сверхпроводящее состояние, — **температурой сверхпроводящего перехода**. Иногда температуру T_C называют критической температурой.

После открытия сверхпроводимости было выявлено, что и другие металлы при сверхнизких температурах приобретают свойство сверхпроводимости. В настоящее время материалом с наиболее высокой критической температурой 135 К является соединение $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$, открытое в МГУ С.Н.Путилиным и Е.В.Антиповым в 1993 г. В настоящее время известно уже более 35 металлов и более тысячи сплавов и химических соединений, обладающих свойством сверхпроводимости. Каждый сверхпроводник имеет определенную температуру сверхпроводящего перехода.

Поскольку сопротивление у сверхпроводника отсутствует, то ток может протекать по нему неограниченно долго. В сверхпроводящем состоянии ток течет не по всему сечению проводника, а в тонком поверхностном слое. Плотность тока при этом на несколько порядков больше, чем в нормальном состоянии. Величина допустимой плотности тока ограничена тем, что ток может разрушить сверхпроводящее состояние, если сила его превысит некоторое критическое для данного материала значение. Плотность тока в сверхпроводнике, при которой начинается разрушение сверхпроводимости, называют **критической плотностью тока** I_k . Каждому значению температуры данного материала, находящегося в сверхпроводящем состоянии, соответствует свое значение критической плотности тока, а следовательно, и индукции перехода B_C . Индукция перехода B_C может быть создана током, идущим по самому сверхпроводнику или сторонним источником магнитного поля. Каждому значению индукции B_C соответствует напряженность магнитного поля

$$H_C = B_C / \mu_0,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Для чистых металлов зависимость между индукцией магнитного поля и температурой выражается соотношением

$$B_C = B_{C0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{C0}} \right)^2 \right],$$

где B_{C0} — значение магнитной индукции перехода в сверхпроводящее состояние при температуре абсолютного нуля, т. е. при 0 К;

$T_{\text{св}}$ — температура перехода в сверхпроводящее состояние при отсутствии магнитного поля.

В 1933 г. немецкие физики В. Майснер и Р. Оксенфельд обнаружили, что сверхпроводники при переходе в сверхпроводящее состояние становятся идеальными диамагнетиками, т.е. их относительная магнитная проницаемость скачком падает с $\mu \approx 1$ до $\mu \approx 0$. Поэтому внешнее магнитное поле не проникает в сверхпроводящее тело, оно «выталкивается» из него, силовые линии магнитного поля огибают сверхпроводник. Это явление обусловлено тем, что в поверхностном слое сверхпроводника при его внесении в магнитное поле возникает круговой незатухающий ток, который полностью компенсирует внешнее поле в толще образца. Поверхностный слой очень мал. Например, у свинца он составляет около 40 нм. Эффект выталкивания выражается настолько сильно, что открываются возможности удерживать груз в пространстве с помощью магнитного поля.

С момента открытия явления сверхпроводимости сущность его в течение почти полувека оставалась неразгаданной. Современная теория сверхпроводимости металлов была создана только в 1957 г. Д. Бардиным, Л. Купером и Дж. Шриффером и получила название теории БШК. Значительный вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли работы академика Н. Н. Боголюбова.

Теория БШК объясняет явление сверхпроводимости металлов с помощью квантовых представлений следующим образом. При температурах, близких к абсолютному нулю, меняется характер взаимодействия электронов между собой и ионами кристаллической решетки. Если при обычных температурах электроны металла испытывают на себе кулоновские силы отталкивания, то при очень низких температурах два электрона, находящиеся по разные стороны от положительно заряженного иона, находящегося в узле кристаллической решетки, за счет этого иона испытывают притяжение друг к другу. Силы притяжения преобладают над силами отталкивания. В результате два электрона, находящиеся по разные стороны от положительно заряженного иона образуют так называемую электронную, или куперовскую, пару. В куперовских парах электроны имеют противоположные спины. Под действием электрического поля все куперовские пары движутся согласованно как одно целое с некоторой дрейфовой скоростью, не рассеиваясь на тепловых колебаниях кристаллической решетки и ее дефектах. Благодаря спариванию электронов исключаются факторы, ограничивающие длину их свободного пробега. Движение этих частиц уже нельзя рассматривать независимо друг от друга. Фак-

тически движение всех электронных пар можно рассматривать как распространение одной электронной волны, которая не рассеивается решеткой, а «обтекает» дефекты структуры.

Одно из главных применений сверхпроводников связано с получением сверхсильных магнитных полей. Сверхпроводящие соленоиды позволяют получать однородные магнитные поля напряженностью более 10^7 А/м в достаточно большой области пространства, в то время как пределом обычных электромагнитов с железными сердечниками являются напряженности порядка 10^6 А/м.

В сверхпроводящих магнитных системах циркулирует незатухающий ток, поэтому не требуется внешний источник питания. Сильные магнитные поля необходимы при проведении научных исследований. Сверхпроводящие соленоиды позволяют в значительной мере уменьшить габаритные размеры и потребление энергии в синхрофазотронах, коллайдерах и других ускорителях элементарных частиц.

Перспективно использование сверхпроводящих магнитных систем для удержания плазмы в реакторах управляемого термоядерного синтеза; в магнитогидродинамических преобразователях тепловой энергии в электрическую; в качестве индуктивных накопителей энергии для покрытия пиковых мощностей в масштабах крупных энергосистем. Широкое развитие получают разработки электрических машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Применение сверхпроводников позволяет исключить из машин сердечники из электротехнической стали, благодаря чему их масса и габаритные размеры при сохранении мощности уменьшаются в 5—7 раз. Экономически обосновано создание сверхпроводящих трансформаторов, рассчитанных на высокий уровень мощности (десятки—сотни мегаватт). Значительное внимание в разных странах уделяется разработке сверхпроводящих линий электропередач на постоянном и переменном токе. Разработаны опытные образцы импульсных сверхпроводящих катушек для питания плазменных пушек и систем накачки твердотельных лазеров.

3.1.4. Благородные металлы

К благородным относятся наиболее химически стойкие металлы: золото, серебро, платина, палладий. Они встречаются в природе в виде самородков и в различных рудах. В результате металлургической, химической и электролитической переработки удается получить металлы очень высокой чистоты: золото — 99,998 %;

серебро — 99,999 %; платина — 99,9998 %; палладий — 99,94 %. Наиболее широко они применяются для изготовления контактов.

Золото. Это блестящий металл желтого цвета, обладающий высокой пластичностью. В электронной технике золото используют как контактный материал, материал для коррозионно-устойчивых покрытий резонаторов, внутренних поверхностей волноводов. Существенным достоинством золота как контактного материала является его стойкость к образованию сернистых и окисных пленок в атмосферных условиях (как при комнатной температуре, так и при нагревании). Тонкие пленки золота применяются в качестве полупрозрачных электродов в фоторезисторах и полупроводниковых фотоэлементах, а также в качестве межсоединений и контактных площадок в пленочных микросхемах. В последнем случае из-за плохой адгезии к диэлектрическим подложкам пленки золота наносят обычно с адгезионным подслоем (чаще всего хрома).

В контактах золота с алюминием происходит постепенное образование ряда интерметаллических соединений, обладающих повышенным удельным сопротивлением и хрупкостью. Поэтому контакты тонких пленок золота и алюминия ненадежны.

Серебро. Это белый блестящий металл, стойкий к окислению при нормальной температуре, от других металлов отличается наименьшим удельным сопротивлением. Является более прочным материалом, чем золото. Серебро применяется в широкой номенклатуре контактов в аппаратуре разных мощностей. Высокие значения удельных теплоемкости, теплопроводности и электрической проводимости серебра обеспечивают по сравнению с другими металлами наименьший нагрев контактов и быстрый отвод теплоты от контактных точек. Серебро используют для изготовления радиочастотных кабелей, в припоях, для защиты медных проводов, также для непосредственного нанесения на диэлектрики, в качестве электродов, в производстве керамических и слюдяных конденсаторов. Для этого применяют метод вжигания или испарения в вакууме. Серебром покрывают внутренние поверхности волноводов для получения слоя высокой проводимости. С этой же целью серебрению подвергают проводники высокочастотных катушек.

Недостатком серебра является склонность к миграции внутри диэлектрика, на который оно нанесено, в условиях высокой влажности, а также при высоких температурах окружающей среды. По сравнению с другими благородными металлами серебро обладает пониженной химической стойкостью. В частности, серебро обладает склонностью к образованию непроводящих темных пленок сульфида Ag_2S в результате взаимодействия с сероводородом, сле-

ды которого всегда присутствуют в атмосфере. Наличие влаги ускоряет протекание реакции, поэтому серебряные контакты не рекомендуется применять по соседству с резиной, эбонитом и другими материалами, содержащими серу.

Серебро хорошо паяется обычными припоями. Широкое применение серебра сдерживается его большим природным дефицитом.

Платина. Это белый металл, практически не соединяющийся с кислородом и стойкий к химическим реагентам. Платина прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкие нити и ленты. В отличие от серебра платина не образует сернистых пленок при взаимодействии с атмосферой, что обеспечивает платиновым контактам стабильное переходное сопротивление. Она практически не растворяет водород, пропуская его через себя в нагретом состоянии. После отжига в водороде платина сохраняет свои свойства. Однако при прокаливании в углеродсодержащей среде платина науглероживается и становится хрупкой.

Платину применяют для изготовления термпар, рассчитанных на рабочие температуры до $1\,600^{\circ}\text{C}$. Особо тонкие нити из платины диаметром около $0,001\text{ мм}$ для подвесок подвижных систем в электрометрах и других чувствительных приборах получают многократным волочением биметаллической проволоки платина—серебро с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует).

Вследствие малой твердости платина редко используется для контактов в чистом виде, но служит основой для некоторых контактных сплавов. Наиболее распространенными являются сплавы платины с иридием. Они не окисляются, имеют высокую твердость, малый механический износ, допускают большую частоту включений, однако дороги и применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую надежность контактов.

Палладий. По ряду свойств он близок к платине и нередко служит ее заменителем, так как дешевле платины в 4—5 раз. Использование палладия в электровакуумной технике обусловлено его способностью интенсивно поглощать водород. Последний (в отличие от других газов) диффундирует в палладий при сравнительно низких температурах ($150\ldots 300^{\circ}\text{C}$) и избыточном давлении $0,015\ldots 0,1\text{ МПа}$, а затем вновь выделяется в чистом виде при нагревании палладия в вакууме до температур $350\ldots 500^{\circ}\text{C}$. Твердый палладий поглощает более чем 850-кратный объем водорода по отношению к собственному объему. Выделенным из палладия чистым водородом наполняют некоторые типы газоразрядных приборов.

Палладий и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве контактных материалов.

В отожженном состоянии палладий обладает весьма хорошими механическими свойствами: предел прочности при растяжении — порядка 200 МПа, относительное удлинение при разрыве — до 40 %.

3.1.5. Тугоплавкие металлы

Материалы, характеризующиеся температурой плавления выше 1700 °С, называют **тугоплавкими**. Как правило, они химически устойчивы при низких температурах, но становятся активными при повышенных. Эксплуатация их при высоких температурах может быть обеспечена в атмосфере инертных газов или в вакууме.

В плотном виде эти металлы чаще всего получают методами порошковой металлургии — прессовкой и спеканием порошков. В электронной технике получают распространение методы электровакуумной технологии производства чистых тугоплавких металлов: плавка электронным или лазерным лучом, зонная очистка, плазменная обработка и др. Механическая обработка этих материалов трудна и нередко требует их подогрева. Основными тугоплавкими металлами являются вольфрам, молибден, тантал, ниобий, хром, ванадий, титан, цирконий и рений.

Все тугоплавкие металлы, за исключением платины, при нагревании на воздухе до высоких температур интенсивно окисляются с образованием летучих соединений, поэтому их можно применять для изготовления лишь тех нагревательных элементов, которые работают в вакууме или защитной среде. Одной из разновидностей таких нагревателей являются испарители, применяемые в установках для вакуумного осаждения тонких пленок.

Вольфрам. Это очень тяжелый, твердый металл серого цвета. Из всех металлов вольфрам обладает наиболее высокой температурой плавления. В природе встречается только в виде соединений. Вследствие высокой температуры плавления получение вольфрама в виде компактного слитка сопряжено со значительными трудностями.

Вольфрам является одним из важнейших материалов электровакуумной техники. Из него изготавливают электроды, подогреватели, пружины, крючки в электронных лампах, рентгеновских трубках и др. В электровакуумном производстве применяют вольфрам марок ВА (с кремнеалюминиевой присадкой) и ВТ (с присад-

кой оксида тория). Добавка оксида тория не только повышает механическую прочность вольфрама, но и улучшает эмиссионные свойства катодов за счет снижения работы выхода электронов.

Вольфрам обладает наименьшим температурным коэффициентом линейного расширения среди всех чистых металлов. Это свойство оказывается ценным при изготовлении термически согласованных спаев вольфрама с тугоплавкими стеклами, которые тоже имеют низкий температурный коэффициент линейного расширения.

Молибден. Этот металл по внешнему виду близок к вольфраму.

При комнатной температуре молибден — химически относительно инертный металл, но более активный, чем вольфрам. На воздухе начинает окисляться при 300 °С с образованием низших оксидов, а при температуре выше 600 °С образуется оксид, который быстро испаряется при 700 °С. Поэтому нагреваемые детали должны работать в вакууме или восстановительной среде.

Среди всех тугоплавких металлов молибден обладает наименьшим удельным сопротивлением.

Высокая прочность молибдена в сочетании с хорошей пластичностью делают его одним из лучших проводниковых материалов для изготовления деталей сложной конфигурации, работающих при высоких температурах. Из молибдена изготавливают сетки и электроды электронных ламп, рентгеновских трубок и различные вспомогательные детали электровакуумных приборов с напряженным тепловым режимом.

Весьма важным является применение молибдена для изготовления вакуумплотных термически согласованных вводов в баллоны из тугоплавкого стекла. Молибден используется также в качестве нагревательных элементов электрических печей. Такие элементы в защитной атмосфере могут устойчиво работать при температуре 1700 °С, при которой еще слабо выражены процессы рекристаллизации в молибдене.

В электровакуумной технике наиболее распространены марки молибдена МЧ (молибден чистый) и МК (молибден с присадкой оксида кремния). Последний обладает повышенной механической прочностью при высоких температурах.

Тантал. Металл, получаемый из мало распространенной руды — танталита $\text{Fe}(\text{TaO}_3)_2$ методами порошковой металлургии подобно вольфраму и молибдену. Тантал характеризуется высокой пластичностью даже при комнатной температуре. Предел прочности его при растяжении может изменяться в зависимости от механической и термической обработки в диапазоне 350 ... 1 250 МПа.

При нагревании на воздухе и при анодном окислении на поверхности тантала образуется плотная пленка оксида Ta_2O_5 , которая не разлагается вплоть до температуры $1500^\circ C$. В противоположность вольфраму и молибдену тантал не становится хрупким при нагревании в вакууме до весьма высоких температур.

Способность тантала поглощать газы в диапазоне температур $600 \dots 1200^\circ C$ в сочетании с тугоплавкостью, хорошей пластичностью и формоустойчивостью ставит этот металл в ряд важнейших материалов электровакуумной техники. Однако ввиду природной дефицитности и относительно высокой стоимости тантал используется преимущественно для ответственных изделий, работающих в напряженном тепловом режиме, или в тех случаях, когда к вакууму предъявляют жесткие требования. В частности, из тантала изготавливают аноды и сетки генераторных ламп, катоды прямого и косвенного накала и различные вспомогательные детали электровакуумных приборов. Тантал широко используется в вакуумной технологии в качестве испарителей при осаждении тонких пленок различных веществ.

Особое значение тантал имеет при производстве конденсаторов. Широко применяются электролитические и тонкопленочные конденсаторы, получаемые анодированием. Тантал образует однородные пленки оксида в водных растворах почти любого электролита. Благодаря повышенной диэлектрической проницаемости Ta_2O_5 такие конденсаторы обладают большой удельной емкостью.

Ниобий. Это металл, по свойствам близкий к танталу и находящийся, как правило, в тех же рудах, что и тантал. Получают его методами порошковой металлургии. Металл, содержащий 99,4 % Nb, высокопластичен и выпускается в виде прутков, листов, ленты, фольги и проволоки.

Ниобий обладает высокой газопоглощающей способностью в интервале температур $400 \dots 900^\circ C$, поэтому в электровакуумных приборах конструктивные детали из ниобия одновременно выполняют функции нераспыляемого геттера. Среди тугоплавких металлов ниобий имеет наименьшую работу выхода электронов, поэтому его применяют в качестве накаливаемых катодов в мощных генераторных лампах.

Хром. Это весьма распространенный в земной коре элемент, обладающий высокой стойкостью к окислению, а потому используемый для защитных покрытий изделий, в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах. Хромирование производят электролитически или с помощью насыщения хромом поверхностных слоев стальных изделий посредством диффузии из внешней среды.

Из тонких пленок хрома изготавливают резисторы и адгезионные подслои для контактных площадок и токопроводящих соединений в интегральных микросхемах, а также светонепроницаемые слои фототаблонов. Электрические свойства хромовых пленок очень чувствительны к условиям нанесения из-за поглощения остаточных газов в процессе осаждения. Однако хром обладает хорошей адгезией к стеклянным, ситалловым и керамическим подложкам. Кроме того, хром хорошо совместим с любым проводящим материалом.

Достоинством хрома также является легкость сублимации при получении пленок. Обычно для этих целей используют вольфрамовый или молибденовый испаритель.

Хром входит в состав большого количества сплавов для нагревательных приборов, термопар, конструкционных нержавеющей, жаропрочных сталей и магнитных материалов.

3.1.6. Сплавы металлов с высокой удельной проводимостью

Сплавы меди. Когда проводник должен обладать повышенными механическими характеристиками и к его электропроводности не предъявляются высокие требования, помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы называют *бронзами*.

Маркируются бронзы буквами Бр, после которых идут буквы, указывающие легирующие элементы, и цифры, показывающие содержание этих элементов в целых процентах. Например, бериллиевая бронза БрБ2 содержит 2 % Be, остальное — Cu. Предел прочности на разрыв у бронз может быть 800 ... 1 200 МПа и более.

Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин контактов и крепящих деталей контактной сети. Введение в медь кадмия при сравнительно малом снижении удельной проводимости дает значительное повышение механической прочности и твердости. Кадмиевую бронзу применяют для контактных проводов и коллекторных пластин особо ответственного назначения. Еще большей механической прочностью обладает бериллиевая бронза. Она применяется для изготовления различных пружинных деталей, выполняющих одновременно и роль проводника тока (например, щеткодержателей, щетпсельных разъемов и др.).

Сплав меди с цинком — *латунь* — хорошо обрабатывается штамповкой, глубокой вытяжкой и др. В соответствии с этим ла-

тунь применяют в электротехнике для изготовления всевозможных токопроводящих деталей: винтов, гаек, шайб, шпилек и контактов штепсельных разъемов. Применяется латунь и для изготовления короткозамкнутых обмоток (беличьих клеток) роторов асинхронных двигателей.

Максимальное содержание цинка в латуни 45 %. Маркируют латуни буквой Л и цифрой, показывающей процентное содержание меди. Например, латунь марки Л63, имеющая максимальную пластичность, содержит 63 % меди и 37 % цинка.

Алюминиевые сплавы. Они обладают повышенной механической прочностью и твердостью. Алюминиевые сплавы можно условно подразделить на электротехнические и конструкционные. Из *электротехнических сплавов* наиболее известным является альдрей, содержащий, %: Mg — 0,3...0,5; Si — 0,4...0,7; Fe — 0,2...0,3 (остальное — Al). Основные свойства альдрея: $\sigma_b = 350$ МПа; $\Delta l/l = 6,5$ %; $\alpha_l = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_p = 0,0036 \text{ K}^{-1}$; $\rho = 0,037 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Этот сплав практически сохраняет легкость алюминия при небольшом увеличении его удельной проводимости, а по механической прочности приближается к твердотянутой меди.

Конструкционные сплавы можно подразделить на литейные сплавы и сплавы, деформируемые обработкой (деформируемые сплавы). Из литейных сплавов наиболее известны сплавы алюминия с кремнием (с небольшими добавками Mg и Mn). Они называются *силуминами*.

Из деформируемых сплавов наиболее широко применяются *дюралюмины* (сплавы системы Al—Cu—Mn) и *авиаль*, содержащий добавку цинка, который делает этот сплав более пластичным, чем дюралюмины.

В электротехнической промышленности сплавы алюминия широко применяются как конструкционный материал. Например, в новой российской серии асинхронных машин РА станины выполняются из алюминиевого сплава, изготавливаются методом экструзии и имеют горизонтальное оребрение, что позволяет увеличить теплоотдачу двигателя при снижении его массы.

3.1.7. Сплавы с низкой удельной проводимостью

Основными требованиями, предъявляемыми к этим сплавам, являются: значение удельного электросопротивления в нормальных условиях не менее 0,3 мкОм·м; низкий температурный коэф-

фициент удельного сопротивления; малая термоЭДС относительно меди; возможность длительной работы на воздухе при температуре порядка 1 000 °С. Указанные свойства позволяют создавать из сплавов изделия, сопротивление которых практически не зависит от температуры: термостабильные резисторы для измерительных приборов, реостатов и нагревательных элементов.

Среди большого количества материалов наиболее распространенными в практике являются сплавы на медной основе — манганин и константан, а также хромоникелевые (нихромы) и железохромоалюминиевые (фехралы) сплавы.

Манганин. Это светло-оранжевый сплав на основе меди, содержащий 2...3 % никеля и 12...13 % марганца. Достоинствами манганина являются очень малая зависимость его удельного сопротивления от температуры и небольшая термоЭДС в контакте с медью. Из манганина вытягивают тонкую проволоку до диаметра 0,02 мм, изготавливают также ленту толщиной 0,01...1,0 мм и шириной 10...300 мм. Для получения малого α_p и высокой стабильности сопротивления во времени манганин подвергают специальной термической обработке — отжигу при 350...550 °С в вакууме с последующим медленным охлаждением и дополнительной длительной выдержкой при комнатной температуре. Максимальная рабочая температура — 300 °С.

Применяют для изготовления добавочных сопротивлений и шунтов высокого класса точности (в составе электроизмерительных приборов или виде самостоятельных изделий), мер электрического сопротивления (катушек и магазинов сопротивлений).

Константан. Это сплав меди из никеля (39...41 %) и марганца (1...2 %), имеет желтоватый оттенок. Содержание никеля в сплаве примерно соответствует максимуму ρ и минимуму α_p для сплавов Cu—Ni. Константан хорошо поддается обработке; его можно протягивать в проволоку и прокатывать в ленту тех же размеров, что и из манганина.

Константан применяют для изготовления реостатов и электронагревательных элементов в тех случаях, когда рабочая температура не превышает 400...450 °С. При нагреве до высокой температуры на поверхности константана образуется пленка оксида, которая обладает электроизоляционными свойствами (оксидная изоляция). Покрытую такой изоляцией константановую проволоку можно наматывать плотно, виток к витку, без особой изоляции между витками, если только напряжение между соседними витками не превышает 1 В. Таким образом, например, изготавливают реостаты. Для окисления константановой проволоки, дающей до-

статочно гибкую и прочную пленку окисла, требуется быстрый (продолжительность не более 3 с) нагрев проволоки до температуры 900 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Константан в паре с медью или железом приобретает большую термоЭДС. Это является недостатком при использовании константановых резисторов в измерительных схемах. За счет разности температур в местах контакта константановых проводников с медными возникают термоЭДС, которые могут явиться источником ошибок, особенно при нулевых измерениях в мостовых и потенциометрических схемах. Однако большое значение термоЭДС позволяет использовать константан для изготовления термопар, работающих до температуры 300 °С. Поскольку в составе константана много дорого и дефицитного никеля, он не находит широкого применения.

Хромоникелевые сплавы (нихромы). Это сплавы на основе никеля, содержащие в зависимости от марки Ni (55...78 %), Cr (15...25 %) и Mn (1,5 %). Используют для изготовления нагревательных элементов электрических печей, плиток, паяльников и других электронагревательных приборов, имеющих рабочую температуру до 1000 °С. Из нихромов изготавливают проволоку диаметром 0,02 мм и более и ленту сечением 0,1 × 1,0 мм и более. Высокую жаростойкость нихрома можно объяснить значительной стойкостью этого сплава к окислению на воздухе при высоких температурах вследствие близких значений температурных коэффициентов линейного расширения сплавов и их оксидных пленок. Поэтому последние не растрескиваются и не отделяются от проволоки при ее нагревании и расширении. Температурные коэффициенты расширения сплава и оксидов хрома и никеля близки, они не одинаковы, поэтому при резких изменениях температуры может происходить растрескивание слоя оксидов. При последующем нагреве кислород проникает в трещины и происходит дополнительное окисление сплава. Следовательно, при многократном кратковременном включении нагревательный элемент из хромоникелевого сплава может перегореть скорее, чем в случае непрерывного режима нагрева (температура нагрева одинакова). В обоих сравниваемых случаях срок службы может отличаться в 20—30 раз.

Срок службы нагревательных элементов можно увеличить, если сделать спирали в твердую инертную среду, предохраняющую от механических воздействий и затрудняющую доступ кислорода.

Из нихромовых сплавов (в частности, из наиболее широко используемого Х20Н80 (20 % Cr и 80 %Ni)) методом термического испарения и конденсации в вакууме получают тонкопленочные ре-

зисторы (например, резисторы интегральных микросхем). Химический состав пленок может заметно отличаться от состава исходного испаряемого сплава, что обусловлено значительными различиями в давлениях паров никеля и хрома при температурах испарения. Обычно применяют тонкие нихромовые пленки с поверхностным сопротивлением $R = 50 \dots 300$ Ом и α_p , изменяющимся в пределах от $-3 \cdot 10^{-4}$ до $+2 \cdot 10^{-4}$ К $^{-1}$. Такие пленки обладают достаточно хорошей адгезией к диэлектрическим подложкам и высокой стабильностью свойств.

Фехрали. Это жаростойкие сплавы с высоким электрическим сопротивлением на основе железа: хром (12...27 %), алюминий (3...5 %), остальное железо. По областям применения являются аналогом нихрома, но за счет отсутствия в составе никеля гораздо его дешевле. Свойства фехралей обусловлены, в частности, тем, что на поверхности сплава образуется высокопрочная пленка Al_2O_3 , которая является изолятором и более эффективно предотвращает коррозию по сравнению с оксидом хрома (Cr_2O_3), образующимся на поверхности нихромов. Пленка оксида хрома менее устойчива, быстрее отслаивается и испаряется, что приводит к сокращению срока службы нагревателя. Использование же нихромов на предельных температурах может привести к тому, что перечисленные ранее продукты испарения могут даже загрязнить нагреваемые поверхности рабочей оснастки и самих термообрабатываемых изделий. Сплавы этого семейства позволяют достичь больших рабочих температур, чем у нихрома, вплоть до 1 400 °С. К *недостаткам* следует отнести рекристаллизационный порог в интервале температур 600...650 °С, что затрудняет использование данного сплава в термоциклическом режиме, а также невысокую пластичность.

Выпускается большое количество родственных сплавов под общим названием фехраль: X23Ю5Т, X27Ю5Т, Суперфехраль GS SY, Еврофехраль GS 23-5, Мегалит 200(X15Ю5).

Суперфехраль GS SY — это сплав X23Ю5Т, микролегированный иттрием и цирконием. Иттрий вводят в жаростойкие сплавы для того, чтобы повысить температуру эксплуатации нагревательной проволоки до 1 450 °С. Иттрий в составе сплава при нагревании покрывается пленкой оксида и нитрида, предохраняющей спираль от дальнейшего окисления и отслаивания окисных пленок, как следствие повышает окалиностойкость, что очень важно для некоторых видов производства (например, обжига керамики). Иттрий действует как раскислитель, связывая водород и азот, что существенно увеличивает пластичность и прочность проволок и лент Суперфехраль GS SY. Добавление иттрия значительно сни-

жает рост зерна при повышенных температурах, поэтому изделия из сплава даже при длительной эксплуатации не становятся хрупкими. Главное отличие еврофехралей от обычных фехралей — это введение в сплав специальной лигатуры, содержащей церий, которая значительно повышает его прочность на разрыв и сопротивление ползучести. Пониженное содержание углерода в сплаве делает проволоку и ленту еврофехраль GS23-5 значительно мягче аналогов, что существенно облегчает навивку спиралей.

Фехрали используются для изготовления пускотормозных резисторов электровозов и вагонного подвижного состава, нагревательных элементов печей и устройств объемного нагрева термических цехов промышленных предприятий, пищевых и прочих производств.

3.1.8. Припой

Припой — это специальные сплавы, применяемые при пайке металлических частей в качестве связующего вещества. Пайка является основным типом неразъемного соединения проводниковых материалов в электронике. Получаемый электрический контакт обладает малым переходным сопротивлением и хорошей механической прочностью.

Припой подразделяются на легкоплавкие (мягкие) и тугоплавкие (твердые). К мягким относятся припой с температурой плавления до 300 °С, а к твердым — с температурой плавления выше 300 °С. В марке припоев буквы обозначают: П (на первом месте) — припой, О — олово, Су — сурьма, С — свинец, А — алюминий, Ср — серебро, М — медь, Кр — кремний, Ви — висмут, Зл — золото, К — кадмий. Цифры, стоящие за буквами, указывают процент содержания массы основного металла в припое.

Среди твердых припоев выделяют медно-цинковые (ПМЦ) и медно-серебряные (ПСр), которые отличаются малым удельным сопротивлением, прочностью и коррозионной стойкостью паяных швов. Припой на алюминиевой основе с добавками меди, кремния и олова применяют, когда требуется достаточная механическая прочность и стойкость к атмосферной коррозии при пайке алюминиевых проводов и деталей из него и его сплавов.

Для повышения надежности пайки применяют флюсы. Они предназначены для очистки поверхностей металлов перед пайкой от оксидов и других загрязнений и предохранения поверхностей металлов от окисления в процессе пайки.

По действию, оказываемому на металл, флюсы подразделяются на бескислотные (канифоль) и кислотные. Активные или кислотные флюсы изготавливают на основе активных веществ; соляной кислоты, хлористых и фтористых соединений металлов и т.п. Они интенсивно растворяют оксидные пленки на поверхности металла, однако даже небольшой остаток этих флюсов после пайки вызывает интенсивную коррозию спаев и основных металлов. Применяют такие флюсы, когда возможны очистка и полное удаление их остатков. Обычно такие флюсы используют для пайки алюминия.

Если к канифоли добавить *активаторы* — небольшие количества солянокислого или фосфорнокислого анилина, то образуются активированные флюсы, высокая активность которых позволяет вести пайку без предварительного удаления оксидов после обезжиривания.

3.1.9. Неметаллические проводниковые материалы

Наряду с металлами и металлическими сплавами в качестве резистивных, контактных и токопроводящих элементов достаточно широко используются различные композиционные материалы, некоторые оксиды и проводящие модификации углерода. Как правило, эти материалы имеют узкоспециализированное назначение.

Углеродистые материалы. Среди твердых неметаллических проводников наиболее широкое применение в электротехнике получил *графит* — одна из аллотропных форм чистого углерода. Наряду с малым удельным сопротивлением ($\rho = 0,05 \dots 1,2 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$) ценными свойствами графита являются значительная теплопроводность, стойкость ко многим агрессивным средам, высокая теплоустойчивость, легкость механической обработки. Для производства электроугольных изделий используют природный и искусственный графит, антрацит и пиролитический углерод. Кроме того, в качестве проводниковых материалов используются стеклоуглерод и бороуглеродистые пленки.

Природный графит — минерал, наиболее распространенная и устойчивая в земной коре гексагональная полиморфная модификация углерода метаморфического, магматического происхождения. Он представляет собой темно-серые до черных чешуйчатые агрегаты, конкреции, сплошные массы с очень высокой температурой плавления (порядка $3\,900^\circ\text{C}$). Качество природных графитов невысокое; они содержат много примесей, пористы, свойства поч-

ти изотропны. Поэтому для технических целей используется графит искусственный, получаемый из углей и коксов при нагреве до высоких температур (2 500...3 200 °С). Антрацит может рассматриваться как переходная стадия между каменным углем и графитом. От других видов угля антрацит отличается высоким содержанием связанного углерода (91...98 %), низким содержанием влаги, серы, летучих веществ, высокой удельной теплотой сгорания. Обладает высокой электропроводностью.

Пиролитический углерод получают путем термического разложения паров углеводородов в вакууме или в среде инертного газа (пиролиз). В качестве веществ, подвергаемых пиролизу, обычно выбирают соединения метанового ряда. Получение пироуглерода происходит путем кристаллизации из газовой фазы на гладкой твердой поверхности. Изначально происходит образование «зародышей» на поверхности и их рост, в процессе которого атомы газообразного углерода взаимодействуют с углеродом «зародышей», в результате чего образуется твердая структура. Рост твердой структуры происходит в виде конуса. Медленно расширяясь, основания конусов заполняют всю поверхность образования «зародышей», превращаясь в цилиндры. Внутри слои углеродных атомов образуют графитоподобную структуру. Особенностью структуры пиролитического углерода является отсутствие строгой периодичности в расположении слоев (в отличие от графита) при сохранении их параллельности. Существуют два типа пироуглерода, структура и свойства которых определяются температурами образования: низкотемпературный (800...1 100 °С) и высокотемпературный (1 400...2 200 °С). Пленки пиролитического углерода широко применяются для получения линейных резисторов поверхностного типа. Углеродистыми резисторами называют резисторы поверхностного типа, проводящий элемент которых представляет собой пленку пиролитического углерода, полученную путем разложения углеводородов в вакууме или в среде инертного газа при высокой температуре. В радиоэлектронной аппаратуре используют пленочные резисторы ВС в виде керамических цилиндрических стержней или трубок, на поверхность которых нанесен слой углерода, покрытый лаковой пленкой. Благодаря малой стоимости применяются весьма широко. Условия работы резисторов ВС: постоянное, переменное и импульсное напряжения; диапазон рабочих температур от -60 до +100 °С; относительная влажность до 98 %.

Мелкодисперсной разновидностью углерода является **сажа**. Ее получают как продукт неполного сгорания или термического разложения углеродсодержащих веществ без доступа воздуха. Будучи

введенной в связующее вещество, сажа проявляет склонность к структурообразованиям. Лаки, в состав которых в качестве пигмента введена сажа, обладают малым удельным сопротивлением и могут быть использованы для выравнивания электрического поля в электрических машинах высокого напряжения.

К электроугольным изделиям, применяемым в электротехнике и технике связи, относятся: электрические щетки для коллекторов электромашин; электроугли, применяемые в лампах и электропечах; электроды в гальванических элементах; угольные мембраны и угольные порошки используют в микрофонах для создания сопротивления, изменяющегося от звукового давления. Из угля делают высокоомные резисторы, разрядники для телефонных сетей; угольные изделия применяют в электровакуумной технике.

Графит широко используется в технологии полупроводниковых материалов для изготовления разного рода нагревателей и экранов, лодочек, тиглей, кассет и т. п. В вакууме или защитных газовых средах изделия из графита могут эксплуатироваться при температуре до 2500 °C.

Стеклоуглерод. Среди углеграфитовых материалов особое место принадлежит стеклоуглероду — материалу, сочетающему в себе свойства графита (хорошая электропроводность) и стекла (высокая твердость, стойкость в агрессивных средах и газонепроницаемость). Стеклоуглерод состоит из чистого углерода с небольшой примесью высокомолекулярных углеводородов. Благодаря этому он химически нейтрален и устойчив к коррозии при воздействии кислот, щелочей и растворителей. В нейтральном газе или в вакууме стеклоуглерод не разрушается и не плавится при нагревании до 3000 °C. На воздухе же при нагревании выше 500 °C он начинает медленно сгорать.

Стеклоуглерод получают путем карбонизации высокомолекулярных углеводородов. Обычно используются специальные термореактивные полимеры, которым придают форму нужного изделия, а затем обжигают при температуре порядка 2000 °C в вакууме или инертной атмосфере газов в течение длительного времени. Российская промышленность производит три основные марки стеклоуглерода: СУ-850, СУ-2000 и СУ-2500 (число указывает рабочую температуру). Из стеклоуглерода изготавливают тигли и электроды.

Бороуглеродистые пленки. Применяют для изготовления поверхностных сопротивлений различных типов. Пленки получают в результате пиролиза борорганических соединений, например $B(C_4H_9)_3$ или $B(C_3H_7)_3$. Они обладают малым температурным коэффициентом удельного сопротивления. Пиролитическая углеродная

пленка является проводящим элементом бороуглеродистых лакированных прецизионных (БЛП) резисторов, содержит небольшое количество бора (2...5 %), что позволяет значительно снизить температурный коэффициент сопротивления и ЭДС шумов, имеют меньшее удельное сопротивление по сравнению с обычными углеводистыми. Лучшая стабильность параметров при работе под нагрузкой и при хранении достигается и тем, что у них более толстый слой углерода, более влагоустойчивое лаковое покрытие и размеры их больше, т. е. перегрев меньше. Резисторы БЛП предназначены для использования в основном в измерительной аппаратуре в высокоточных электрических цепях постоянного, переменного и импульсного тока в качестве элементов навесного монтажа. Резисторы неизолированные т. е. не допускают касания своим корпусом шасси аппаратуры. Имеются два конструктивных варианта: с осевыми проволочными и с радиальными ленточными выводами.

3.1.10. Композиционные проводящие материалы

Композиционные проводящие материалы — механическая смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. Путем изменения состава и характера распределения компонентов можно в достаточно широких пределах управлять электрическими свойствами таких материалов. Особенностью всех композиционных материалов является частотная зависимость проводимости и старение при длительной нагрузке. В ряде случаев заметно выражена нелинейность электрических свойств.

В качестве компонентов проводящей фазы используют металлы, графит, сажу, некоторые оксиды и карбиды. Функции связующего вещества могут выполнять как органические, так и неорганические диэлектрики. Среди многообразия комбинированных проводящих материалов наибольшего внимания заслуживают контактолы и керметы.

Контактолы, используемые в качестве токопроводящих клеев, красок, покрытий и эмалей, представляют собой маловязкие или пастообразные полимерные композиции. В качестве связующего вещества в них используют различные синтетические смолы (эпоксидные, фенольно-формальдегидные, кремнийорганические и др.), а токопроводящим наполнителем являются мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля, палладия). Необходимая вязкость контактолов перед их нанесением на поверхность обе-

спечивается введением растворителей (ацетон, спирт и др.). Большую роль в формировании контактов между частицами металлов композиции играют внутренние напряжения, возникающие при отверждении в результате усадки из-за улетучивания растворителя и полимеризации связующего вещества. Внутренние напряжения приводят к появлению контактного давления между частицами наполнителя, что обуславливает резкое уменьшение контактных сопротивлений.

Контакты используют для получения контактов между металлами, металлами и полупроводниками, для создания электродов на диэлектриках, экранирования помещений и приборов от помех, для токопроводящих коммуникаций на диэлектрических подложках, в гибких волноводах и других изделиях электронной промышленности.

Керметы — металлodieлектрические композиции с неорганическим связующим. Они предназначены для изготовления тонкопленочных резисторов. Одним из важнейших достоинств керметных пленок является возможность варьирования их удельным сопротивлением в широких пределах. Наибольшее распространение получила микрокомпозиция Cr—SiO, тонкие пленки которой изготавливают методом термического испарения и конденсации в вакууме с последующей термообработкой для стабилизации свойств. При термообработке за счет взаимодействия компонентов происходит вытеснение оксидной прослойки между зернами с образованием фазы Cr₃Si.

В толстопленочных микросхемах используют резисторы, получаемые на основе композиции стекла с палладием и серебром. Для этой цели стекло размалывают в порошок до размера зерен 3... 5 мкм, смешивают с порошком серебра и палладия, вспомогательной органической связкой и растворителем. Получаемую пасту наносят на керамическую подложку и спекают в обычной атмосфере. Удельное сопротивление пленок зависит от процентного содержания проводящих компонентов и режима спекания.

3.1.11. Проводящие материалы на основе оксидов

Подавляющее большинство чистых оксидов металлов в нормальных условиях является хорошими диэлектриками. Однако при неполном окислении (при нарушении стехиометрического состава за счет образования кислородных вакансий), а также при введении

некоторых примесей проводимость оксидов резко повышается. Такие материалы можно использовать в качестве контактных и резистивных слоев. Наибольший практический интерес представляет диоксид олова. В радиоэлектронике он используется преимущественно в виде тонких пленок. Пленки получают различными способами: термическим вакуумным испарением и конденсацией с последующим отжигом на воздухе, окислением пленок металлического олова, осажденного на диэлектрическую подложку, реактивным катодным распылением или ионно-плазменным распылением и др.

Оксидные пленки SnO_2 отличаются очень сильным сцеплением с керамической или стеклянной подложкой. Прочность сцепления достигает 20 МПа, что намного больше, чем у металлических пленок. Удельное сопротивление пленок зависит от степени нарушения стехиометрического состава и может составлять 10^{-5} Ом·м. Нагрев пленок из SnO_2 выше 240°C приводит к необратимому изменению сопротивления в результате более полного окисления. Вместе с тем пленки устойчивы ко многим химическим средам — разрушаются только плавиковой кислотой и кипящей щелочью. Тонкие слои диоксида олова обладают также ценным оптическим свойством — высокой прозрачностью в видимой и инфракрасной частях спектра.

Сочетание высокой оптической прозрачности и повышенной электрической проводимости пленок SnO_2 позволяет применять их в качестве проводящих покрытий на внутренних стенках стеклянных баллонов электровакуумных приборов, электродов электролюминесцентных конденсаторов и жидкокристаллических индикаторов, передающих телевизионных трубок, преобразователей и усилителей изображения.

Кроме диоксида олова высокой электрической проводимостью и прозрачностью в видимой области спектра обладают пленки оксида индия In_2O_3 . Они имеют аналогичное применение.

3.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводниковые материалы — это вещества, в которых электрический ток образуется движением электронов, а величина удельного сопротивления находится в пределах между проводниками и диэлектриками.

К полупроводникам относятся:

- химические элементы IV, V и VI групп Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева (простые или элемен-

тарные полупроводники): кремний, олово (серое), германий, сера, селен, теллур, йод, бор, углерод (графит), фосфор, сурьма, мышьяк;

- неорганические соединения, состоящие из двух, трех и большего числа элементов, например InSb , Bi_2Te_3 , ZnSiAs_2 , CuAlS_2 , CuGe_2P_8 .

Одним из самых распространенных элементов в земной коре (29,5 % по массе) является кремний. Вместе с германием он стал прототипом широкого класса полупроводников, обладающих алмазоподобной структурой (рис. 3.1).

Каждый атом окружают четыре ближайших атома, которые образуют тетраэдр (четырёхкратная координация).

Некоторые элементы V и VI группы Периодической системы химических элементов также являются полупроводниками. Примеры полупроводников этого типа — фосфор (P), сера (S), селен (Se) и теллур (Te). В этих полупроводниках атомы могут иметь трехкратную (P), двухкратную (S, Se, Te) или четырехкратную координацию. Алмазная структура придает полупроводникам хорошую термическую проводимость и механическую прочность.

Кремний — полупроводник, используемый в солнечных батареях, а в аморфной форме — в тонкопленочных солнечных бата-

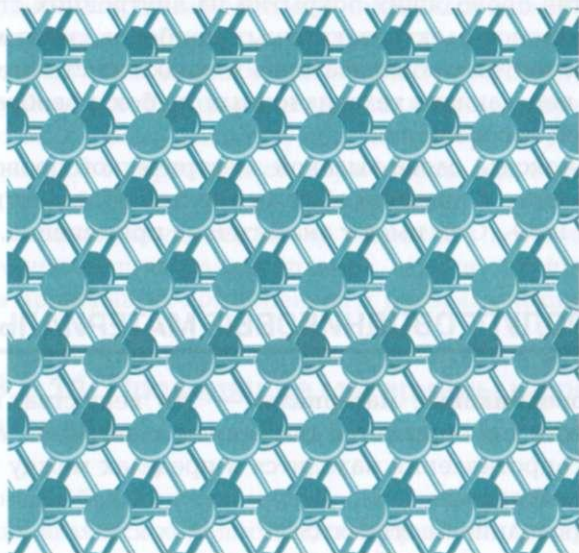


Рис. 3.1. Алмазоподобная структура

реях. Является наиболее используемым полупроводником в фотоэлементах.

Германий — полупроводник, используемый в гамма-спектроscopicии, высокоэффективных фотоэлементах. Использовался в первых диодах и транзисторах. *Селен* — полупроводник, который применяется в селеновых выпрямителях, обладающих высокой радиационной устойчивостью и способностью к самовосстановлению.

В общем случае электроны полупроводников крепко привязаны к своим ядрам. Если в кремний ввести несколько атомов сурьмы, имеющей «избыток» электронов, то в этом случае свободные электроны сурьмы помогут кремнию переносить отрицательный заряд (полупроводник *n*-типа). При замене нескольких атомов полупроводника индием, который легко присоединяет к себе дополнительные электроны, в полупроводнике образуются не занятые электронами «свободные места» («дырки»), которые переносят положительный заряд (полупроводник *p*-типа).

3.3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

3.3.1. Классификация

По агрегатному состоянию диэлектрики подразделяются на три группы: газообразные, жидкие и твердые.

По химическому составу — на органические и неорганические.

По строению диэлектрические материалы подразделяют на нейтральные (неполярные), дипольные (полярные) и ионные.

Нейтральными являются диэлектрики, молекулы которых имеют симметричное строение, в них центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают, и дипольный момент молекул равен нулю. Например, молекулы O_2 , CO_2 , полиэтилена.

В дипольных диэлектрических материалах *полярные* молекулы обладают дипольным моментом, так как центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Примером являются молекулы воды, аммиака, поливинилхлорида.

Ионные диэлектрики состоят из молекул, имеющих ионное строение, например кварц, слюда, каменная соль и корунд (Al_2O_3).

По назначению диэлектрические материалы можно подразделить на электроизоляционные материалы (пассивные) и активные диэлектрики.

Пассивные диэлектрики — диэлектрики, сохраняющие стабильность электрических свойств при внешних энергетических воздействиях.

Активные — диэлектрики, электрические свойства которых можно изменять с помощью внешних энергетических воздействий.

3.3.2. Поляризация диэлектриков

Основным процессом, возникающим в проводниковых и полупроводниковых материалах при воздействии внешнего электрического поля, является протекание тока. В диэлектрике главным процессом, происходящим под действием электрического поля, является поляризация.

Поляризация — незначительное смещение или ориентация связанных зарядов в диэлектрике, приводящее к возникновению внутреннего электрического поля, направленного противоположно внешнему.

Существует два вида поляризации: мгновенная и замедленная.

Мгновенная поляризация характеризуется очень малым временем установления ($10^{-17} \dots 10^{-15}$ с), упругим смещением частиц и отсутствием рассеяния энергии в виде теплоты. Мгновенная поляризация может быть:

- электронной — упругое смещение и деформация электронных оболочек атомов, молекул и ионов (рис. 3.2, а);
- дипольной — ориентация диполей по направлению внешнего электрического поля (рис. 3.2, б);
- ионной — упругим смещением ионов на расстояния, меньшие постоянной решетки (рис. 3.2, в).
- **Замедленная** (ее называют также тепловой или релаксационной) **поляризация** имеет больший период установления, характеризуется неупругим смещением частиц и потерями энергии, приводящими к нагреву диэлектрика. При релаксационной поляризации наблюдается запаздывание в установлении равновесия частиц диэлектрика по отношению к внешнему электрическому полю.

Различают несколько видов замедленной поляризации.

Электронно-релаксационная поляризация. Характерна для твердых материалов, имеющих дефекты в строении (например,

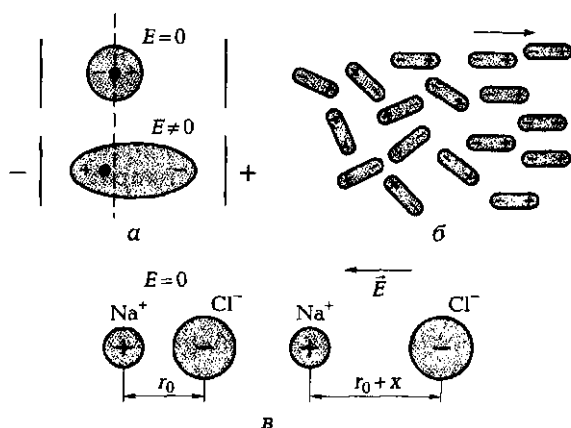


Рис. 3.2. Виды мгновенной поляризации:

а — электронная; б — дипольная; в — ионная

анионные вакансии или примесные ионы, способные захватывать электроны). Этот вид поляризации имеет существенное значение для технических керамик на основе оксидов титана, циркония, ниобия, тантала.

Дипольно-релаксационная поляризация. Она аналогична дипольной — так же происходит преимущественная ориентация диполей по направлению внешнего электрического поля. Отличие заключается в запаздывании (релаксации) относительно времени изменения электрического поля. При снятии электрического поля диполи не моментально возвращаются в исходное положение, а спустя некоторое время вследствие теплового колебания. Время, за которое поляризация уменьшается в e раз, т. е. приблизительно в 2,7 раза (e — основание натуральных логарифмов) называется **временем релаксации**. Такая поляризация присуща, например, полярным органическим или элементоорганическим полимерам, в которых под действием поля происходит определенное упорядочение полярных радикалов или более крупных частей макромолекул — сегментов.

Ионно-релаксационная поляризация. Характерна для диэлектриков с ионным типом строения кристаллической решетки (например, неорганические стекла, электротехнический фарфор, силикаты, мусковит, микалекс).

В диэлектриках с ионным типом строения кристаллической решетки возможно существование слабо связанных с решеткой

ионов, чаще находящихся в междоузлиях или вблизи структурных дефектов. В отсутствие внешнего электрического поля они хаотично перемещаются в различных направлениях на расстояния, превышающие размеры ионов, но не превышающие параметры решетки. Под действием электрического поля перемещение ионов становится упорядоченным и направленным в основном по направлению поля. Для перемещения ионов требуется определенное время, что и объясняет запаздывание поляризации.

Помимо рассмотренных видов поляризации в диэлектрике могут наблюдаться следующие виды поляризации, связанные с потерей электрической энергии.

Миграционная или структурная поляризация. Обусловлена неоднородностью структуры диэлектрика, наличием включений и отдельных слоев, обладающих проводниковыми или полупроводниковыми свойствами.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Характерна для группы твердых диэлектриков с ионной структурой. Особенности их строения приводят к возникновению электрического момента в каждой элементарной кристаллической ячейке. Моменты группы соседних ячеек выстраиваются параллельно друг другу вследствие энергетической выгоды такого процесса, и в диэлектриках возникают отдельные области (домены), обладающие электрическим моментом еще в отсутствие внешнего поля. Ориентация электрических моментов в разных доменах различная, и результирующий момент равен нулю. Под действием внешнего электрического поля происходит преимущественная ориентация моментов доменов в направлении поля и возникает очень сильная поляризация диэлектрика.

Вещества, обладающие самопроизвольной поляризацией, называются **сегнетоэлектриками**, так как у сегнетовой соли этот процесс ярко выражен и был обнаружен впервые.

Технические диэлектрики обладают, как правило, не одним, а одновременно несколькими видами поляризации.

Если процесс поляризации происходит без потерь энергии, то его характеризуют значением относительной диэлектрической проницаемости.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ — отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости конденсатора тех же размеров с вакуумом между пластинами:

$$\epsilon = C/C_0,$$

где C — емкость конденсатора с данным диэлектриком, C_0 — емкость конденсатора с вакуумом.

Если поляризация сопровождается рассеиванием энергии, вызывающим нагрев диэлектрика, ее дополнительно характеризуют углом диэлектрических потерь δ или тангенсом этого угла $\operatorname{tg}\delta$.

3.3.3. Электропроводность диэлектрических материалов

Если поместить диэлектрик в постоянное электрическое поле, в нем может наблюдаться протекание постоянного тока, названного **током сквозной проводимости** $I_{\text{ск}}$. Кроме того, в короткие промежутки времени после включения и выключения напряжения в материале текут токи, вызванные различными видами поляризации. Сумма токов, вызванных различными видами поляризации, называется **током абсорбции** $I_{\text{аб}}$. У большинства диэлектриков время существования тока абсорбции не превышает долей секунды, но в некоторых случаях оно может достигать десятков секунд и более (рис. 3.3).

Практически измерить поляризационные токи практически трудно, поэтому сопротивление изоляции обычно рассчитывают как частное от деления напряжения на величину тока, измеренную через 1 мин после включения напряжения.

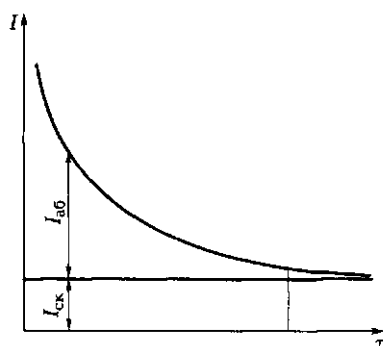


Рис. 3.3. Зависимость тока I в диэлектрике от времени воздействия τ постоянного электрического поля

При длительном нахождении твердых и жидких диэлектриков под напряжением сквозной ток через них с течением времени уменьшается или увеличивается. Если ток с течением времени уменьшается, то электропроводность материала была в большой степени обусловлена ионами посторонних примесей, которые нейтрализовались вблизи электродов, и диэлектрик очистился. Увеличение тока со временем происходит в случае участия в нем зарядов, являющихся структурными элементами самого материала, и протекании в диэлектрике необратимого процесса электрического старения, способного привести к разрушению диэлектрика, т.е. его пробую.

Для оценки электропроводностей диэлектриков пользуются значениями удельного объемного сопротивления и удельного поверхностного сопротивления.

Удельное объемное сопротивление — сопротивление куба диэлектрического материала с ребром единичной длины, если ток проходит через две его противоположные грани.

Удельное объемное сопротивление плоского образца при однородном электрическом поле определяют по формуле

$$\rho_V = R_V S / h,$$

где R_V — объемное сопротивление образца, Ом; S — площадь электрода, м²; h — толщина образца, м.

В системе СИ удельное объемное сопротивление измеряют в [Ом·м].

Удельное поверхностное сопротивление — сопротивление квадрата диэлектрика со стороной единичной длины, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата:

$$\rho_S = R_S a / b,$$

где R_S — поверхностное сопротивление образца материала между параллельно поставленными электродами шириной a , отстоящими друг от друга на расстоянии b .

В системе СИ удельное поверхностное сопротивление измеряют в омах.

Полное сопротивление твердого диэлектрика рассчитывается по формуле

$$R = \frac{R_V R_S}{R_V + R_D}.$$

3.3.4. Пробой диэлектриков

Если напряженность электрического поля, в котором находится диэлектрик, превысит некоторое критическое значение, то материал теряет изоляционные свойства. Это явление называется **пробоем диэлектрика**.

Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрического материала, называется **пробивным**, а соответствующее значение напряженности поля — **электрической прочностью диэлектрика**. Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах (кВ).

Электрическая прочность определяется величиной пробивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика h в месте пробоя:

$$E_{пр} = U_{пр} / h.$$

В системе СИ электрическая прочность выражается в вольтах, деленных на метры (В/м), практически же пользуются другой размерностью — киловольтами, деленными на миллиметры (кВ/мм) или на сантиметры (кВ/см).

Причинами пробоя могут быть не только электрические процессы, но и тепловые, и химические явления в диэлектриках, возникающие под действием электрического поля.

3.3.5. Пассивные диэлектрики

Неполярные полимеры. Неполярные полимеры характеризуются отсутствием дипольного момента у мономера, малыми диэлектрическими потерями и термопластичными свойствами. Основными материалами этой группы являются полиэтилен, полипропилен и фторорганические полимеры — полиизобутилен и политетрафторэтилен.

Полиэтилен получают из мономера этилена $H_2C=CH_2$. Различают полиэтилен низкого (получают при давлении 0,3...0,6 МПа и температуре около 80 °С), среднего (получают при давлении 3...7 МПа температуре 160...275 °С) и высокого давления (при давлении до 300 МПа и температуре около 200 °С).

Из полиэтилена получают пористые (вспененные) материалы путем введения веществ, способных при нагреве разлагаться с выделением газов. Пористый полиэтилен имеет очень низкую плот-

ность ($0,4 \dots 0,5 \text{ г/см}^3$), малую диэлектрическую проницаемость ($1,4 \dots 1,5$), что важно при использовании его в радиочастотной электрической изоляции. Дает возможность значительно уменьшить вес изоляции и диэлектрическую проницаемость до заданной величины.

На воздухе, при освещении и особенно при длительном нагревании полиэтилен «стареет», снижая механическую прочность. Для предотвращения процесса вводят антиокислители.

Полипропилен (мономерное звено $\text{H}_2\text{C}=\text{CHCH}_3$) имеет близкие к полиэтилену электроизоляционные свойства. Применяют в силовых конденсаторах.

Полиизобутилен (мономер $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$) обладает хорошей холодоустойчивостью, малой влагонепроницаемостью. При низкой степени полимеризации является вязкой жидкостью. Число звеньев может достигать до 400 тыс. Применяют для изготовления изоляций.

Политетрафторэтилен (мономер $\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$) выпускается под названием фторопласт-4 (фторлон-4), цифра указывает на число атомов фтора в мономере. За рубежом название материала — тефлон (дайфлон). Имеет очень высокую для органического вещества теплостойкость (300°C) и химическую стойкость (превосходит золото и платину). Взаимодействует только с расплавленными щелочными металлами, фтором и трифторидом хлора при повышенной температуре. Причиной такого поведения является высокая энергия связи $\text{C}-\text{F}$ и экранизирующее влияние атомов F на связи между атомами C . Фторопласт-4 негорюч, негигроскопичен и не смачивается водой и другими жидкостями.

Обладает лучшими электроизоляционными свойствами из известных диэлектриков. Его значение ϵ в диапазоне частот $50 \dots 1010 \text{ Гц}$ составляет $1,9 \dots 2,2$; $\text{tg } \delta = 0,0001 \dots 0,0003$; удельное сопротивление — $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Полярные полимеры. Полярные полимеры обладают сильной дипольно-релаксационной поляризацией, высокими диэлектрическими потерями и пониженными электроизоляционными свойствами, особенно на высоких частотах. Наиболее широко используются следующие полярные полимеры.

Поливинилхлорид (ПВХ) — этилен, у которого атом водорода H замещен на атом хлора Cl . Это материал жесткий и негибкий. Для придания эластичности к ПВХ добавляют пластификаторы — органические полярные жидкости с высокой точкой кипения. Они ослабляют взаимодействие между молекулярными цепями диэлектрика, и макромолекулы начинают перемещаться друг

относительно друга. ПВХ стоек к воздействию воды, щелочей, разбавленных кислот и нефтепродуктов. Применяют для изоляции проводов, защитных оболочек кабелей.

Полиакрилат (мономер $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{COOH}$) известен под названием органическое стекло, плексиглас и др. Прозрачный бесцветный материал, широко применяется как конструкционный.

Полиуренаты — полимеры, в цепочках молекул которых между углеводородными остатками располагаются группы — NHCOO -. Полиуретаны применяют для эмалирования проводов, они удобны при монтаже, поскольку их можно паять без снятия эмали, более теплостойки, чем провода лакированные, но уступают проводам с полиэфирной изоляцией.

Пластические массы (пластмассы). Пластмассы состоят из связующего вещества (полимеры или искусственные смолы); наполнителя (порошкообразного, волокнистого, листового); пластификатора, увеличивающего пластичность, морозостойкость, облегчающего получение изделий; антиоксиданта, увеличивающего срок службы пластмассы; красителя, придающего пластмассе определенную окраску.

В качестве связующего наиболее широко используют следующие смолы.

Фенольно-формальдегидные смолы производят, нагревая в закрытом реакторе в присутствии катализатора водный раствор фенола и формальдегида. Могут изготавливаться как термореактивными, так и термопластичными. Если при смолообразовании на 1 моль фенола приходится не менее 1 моля формальдегида и используется щелочной катализатор (аммиак для смол электроизоляционного назначения), получается термореактивная смола — бакелит. Он обладает высокой механической прочностью и малозластичен. Отрицательным свойством бакелита является склонность к трекингу (образованию на его поверхности проводящих электрический ток следов при воздействии электрических разрядов). Применяют для пропитки дерева, других материалов, в частности при изготовлении слоистых пластиков — гетинакса, текстолита.

Если при варке смолы на 1 моль фенола приходится менее 1 моля формальдегида и используется кислотный катализатор (например, соляная кислота), то получится термопластичная смола типа новолока. Он широко используется для изготовления пластических масс, так как после нагрева сохраняет плавкость и растворимость.

Полиэфирные смолы — продукты поликонденсации различных спиртов и кислот (или их ангидридов).

Глифталевые смолы — продукт поликонденсации трехатомного спирта и фталевого ангидрида (продукт окисления нафталина). Они термореактивны, но для запекания требуют более высокой температуры, чем бакелит (более 140 °С). Преимуществом глифталя перед бакелитом являются более высокие эластичность, клейкость, стойкость к тепловому старению и трещиностойкость.

Полиэтилентерефталат — термопластичная смола, обладает значительной механической прочностью и высокой температурой размягчения (около 200 °С). При повышении температуры на воздухе заметно окисляется. Применяется для изготовления волокон, гибких пленок, эмалированных проводов. В России смола производится под названием *лавсан*, за рубежом — майлар, хостафан, терен, дакрон и др.

Эпоксидные смолы характеризуются наличием в их молекуле эпоксидных групп («колец»). В зависимости от типа отвердителя отверждение может производиться при нагреве (обычно до 80...150 °С) или при комнатной температуре (холодное отверждение). Отверждение может производиться без внешнего давления, что упрощает технологический процесс, или при повышенном давлении. В последнем случае электрическая изоляция обладает более высокой электрической прочностью, чем кремнийорганические смолы (полиорганосилоксаны и силоксаны). Основа строения молекулы — группировка чередующихся атомов кремния и кислорода, названная силоксановой. Связь Si—O более прочна, чем связь C—C, но менее прочна, чем C—F во фторорганических соединениях, что и определяет более высокую теплостойкость кремнийорганических соединений по сравнению с большинством органических полимеров. Полиорганосилоксаны могут иметь линейное строение и термопластичные свойства и образовывать пространственные структуры, становясь термореактивными. Обладают высокими электроизоляционными свойствами даже при повышенной температуре, что позволяет использовать их в композициях с теплостойкими неорганическими материалами (слода, стекло волокно, асбест) в виде миканитов, стеклолакотканей.

Слоистые пластики. Представляют собой пропитанные смолами слои бумаги (гетинакс), хлопчатобумажной (текстолит), стеклянной (стеклотекстолит).

Прочная и теплостойкая пропиточная бумага при изготовлении **гетинакса** в пропиточной машине разматывается с рулона, проходит через ванну с суспензией фенольно-формальдегидных смол, поднимается в сушильную шахту и через валики наматывается на

приемный механизм. При сушке вода испаряется, бумага нарезается листами требуемого формата, собирается пачками нужной толщины и укладывается между стальными плитами гидравлического пресса. При изготовлении фольгированного гетинакса электролитическая фольга укладывается с одной или двух сторон. Плиты подогреваются горячим паром, пропускаемым через каналы, просверленные в них.

Рабочий режим прессования: давление — 1 МПа, температура — 160...165 °С, период выдержки под давлением — 2...5 мин на 1 мм толщины. По окончании прессования пакет охлаждают до 60 °С, пропуская через каналы вместо горячего пара холодной воды.

Слоистое строение приводит к анизотропии свойств. Например, удельное объемное сопротивление вдоль слоев в 50—100 раз ниже, чем поперек, электрическая прочность вдоль слоев в 5—8 раз ниже, чем поперек. Характеризуется низким значением тангенса угла диэлектрических потерь.

В соответствии с ГОСТ 2718—74 «Гетинакс электротехнический листовой. ТУ» листовой электротехнический гетинакс выпускается различных марок, обозначаемых римскими цифрами I, V, X. Как электроизоляционный материал применяется в условиях нормальной относительной влажности воздуха и в трансформаторном масле: марок I и X — при напряжении ниже 1 000 В, марки V — при напряжении более 1 000 В и частоте тока до 106 Гц.

Текстолит электротехнический листовой — слоистый материал, полученный методом горячего прессования хлопчатобумажных тканей, пропитанных термореактивным связующим на основе фенольно-формальдегидной смолы. Обладает высокой прочностью при сжатии и повышенной ударной вязкостью, прекрасно подвергается механической обработке сверлением, резанием, штамповкой, поэтому он широко применяется при изготовлении деталей, нагруженных знакопеременными электрическими и механическими нагрузками или работающих при трении (втулки, кулачки и др.).

Как электроизоляционный материал текстолит применяется для работы в трансформаторном масле и на воздухе в условиях нормальной относительной влажности окружающей среды при частоте тока 50 Гц. Длительно допустимая рабочая температура от -65 °С до +105 °С.

Стеклотекстолит превосходит текстолит по механическим свойствам, теплостойкости, стойкости к действию агрессивных сред и практически не ухудшает своих свойств при эксплуатации

на воздухе в течение 20 лет и более. Наиболее широко применяется в электротехнической промышленности марка СТЭФ, выпускается на основе стеклоткани средней плотности и модифицированной эпоксидной смолы по ГОСТ 12652—74 «Стеклотекстолит электротехнический листовой. ТУ». Марка СТЭФ имеет класс нагревостойкости 155 °С, обладает высокими диэлектрическими и прочностными свойствами при сравнительно невысокой стоимости и предназначена для работы в трансформаторном масле и на открытом воздухе при нормальной или повышенной влажности. Используется для изготовления изоляционных деталей, применяемых в электродвигателях, трансформаторах, шкафах управления и других низко- и высоковольтных электрических машинах и аппаратах, в аппаратуре электротранспорта (локомотивах поездов, троллейбусах, трамваях).

Резины. Резины применяют в производстве электрических проводов и кабелей в качестве электроизоляционных материалов (электроизоляционные резины) или защитных покровов (шланговые резины).

Основой любой резины является каучук. Применяют натуральный каучук, получаемый из млечного сока гевеи, и искусственный — из продуктов переработки нефти.

Натуральный каучук является полимерным углеводородом с двойными связями состава $(C_5H_8)_n$. Чистый каучук практически неполярен, он имеет удельное электрическое сопротивление 10^{14} Ом·м, $\epsilon = 2,4$ и $\text{tg}\delta = 0,002$.

Для устранения низкой нагревостойкости и морозостойкости каучук подвергают вулканизации, т.е. нагреву с введением в него серы. При этом происходит частичный разрыв двойных связей и сшивание макромолекул каучука атомами серы. Вулканизация приводит к повышению механической прочности и стойкости к растворителям. При введении 1...3 % серы получают мягкую резину, обладающую высокой эластичностью, 30...35 % серы — твердую резину (эбонит) с высокой стойкостью к ударным нагрузкам. Недостатками эбонита, ограничивающими его применение в электротехнике, являются малая теплостойкость и снижение поверхностного электрического сопротивления под действием света вследствие окисления свободной серы и образования ее электропроводящих соединений. Такие соединения необходимо удалять промыванием поверхности эбонитовых деталей нашатырным спиртом. Содержащиеся в резине остатки серы, не связанной химически с каучуком, оказывают вредное влияние на медь (образуется сернистая медь). Поэтому резиновую изоляцию непосред-

ственно на медную жилу не наносят. Медь покрывают разделителем, например оловом, или используют тиурамовую резину, т.е. вместо серы при вулканизации применяют тиурамоорганическое сернистое соединение.

Тиурамовая резина не содержит свободной серы, выдерживает нагревание до $+65^{\circ}\text{C}$. На алюминий резину можно наносить непосредственно.

Бутадиеновый каучук — синтетический диэлектрик, который получают путем полимеризации газообразного углеводорода бутадиена (дивинила) в присутствии катализатора металлического натрия. По составу близок к натуральному каучуку. Его применяют в качестве электрической изоляции, если тщательно удаляют остатки катализатора. При нагреве до $200 \dots 300^{\circ}\text{C}$ (без добавки вулканизирующих веществ) дополнительно полимеризуется в результате частичного разрыва двойных связей и переходит в эскапон. Эскапон по свойствам близок к эбониту, но более теплостойкий и мало подвержен действию кислот и органических растворителей, неполярен, имеет высокие электроизоляционные свойства: $\rho = 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon = 2,7 \dots 3,0$; $\text{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$.

Эскапон применяют для изготовления ряда электроизоляционных материалов (лаков, лакотканей, компаундов).

Стекла. Стекла — это неорганические изотропные псевдоаморфные твердые вещества. Диэлектрические свойства проявляют лишь стекла на основе оксидов SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 . Наибольшее распространение вследствие высокой химической устойчивости, дешевизны и доступности сырьевых компонентов получили силикатные стекла (на основе SiO_2). По наличию в составе щелочных металлов стекла подразделяются на бесщелочные, малощелочные и щелочные.

Электрические свойства стекла зависят от их состава. При нормальной температуре для различных технических стекол удельное электрическое сопротивление $10^6 \dots 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, относительная диэлектрическая проницаемость $3,8 \dots 16,2$, тангенс угла диэлектрических потерь ($2 \cdot 10^{-4}$) $\dots 0,01$. Удельное сопротивление уменьшается с введением в стекло оксидов щелочных металлов с наличием ионов Na или K.

При воздействии на щелочное стекло постоянного напряжения происходит электролиз, который наблюдается в виде отложений у катода щелочного металла. Присутствие в составе стекла двух щелочных металлов увеличивает значение ρ и уменьшает величину $\text{tg} \delta$. Электрическая прочность стекол при электрическом пробое мало зависит от их состава. Решающее влияние

на $E_{\text{пр}}$ оказывают воздушные включения — пузырьки в толще стекла.

В электровакуумной технике широко применяются платиновые, молибденовые, вольфрамовые электровакуумные стекла, название которых происходит по равенству температурного коэффициента линейного расширения α стекла и указанного металла.

По химическому составу **электровакуумные стекла** относятся к группе боросиликатных ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) или алюмосиликатных ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) с добавками щелочных оксидов. У них значение α растет с увеличением содержания щелочного металла.

Изоляторные стекла являются щелочными силикатными. Из них изготавливают герметизированные выводы в металлические корпуса различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов и др.).

Из цветных стекол делают светофильтры, эмали, глазури.

Кварцевое стекло находит широкое применение благодаря сочетанию высокой механической прочности с малым температурным коэффициентом линейного расширения, что обеспечивает высокую стойкость к тепловым импульсам. Высокая теплостойкость и химическая инертность позволяют использовать кварцевое стекло в технологии производства чистых веществ, например полупроводниковых материалов. Из него изготавливают реакторы, ампулы, лодочки, тигли.

Ситаллы — стеклокристаллические материалы, получаемые стимулированной кристаллизацией стекол специального состава. Занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой. Название «ситалл» происходит от слов силикат и кристалл, поскольку первые стеклокристаллические материалы были получены на основе закристаллизованных силикатных стекол. За рубежом ситаллы называют пирокерамами от греческих слов «пирос» — огонь и «керамикос» — глиняный.

Ситаллы получают введением в состав стекол, склонных к кристаллизации, добавок веществ, дающих зародыши кристаллизации. Таким образом удается стимулировать процесс кристаллизации стекла по всему объему изделия и получить материал с однородной микрокристаллической структурой.

Содержание кристаллической фазы к окончанию процесса кристаллизации достигает 95 %, размеры оптимально развитых кристаллов 0,05...1,0 мкм. Стеклофаза распределена между кристаллами в виде тонких прослоек, скрепляющих сами кристаллы. Изменение размеров изделий при кристаллизации не превышает

1...2%. Закристаллизованные участки значительно легче растворяются в плавиковой кислоте, нежели примыкающие к ним стеклообразные области, поэтому травлением можно получать в изделиях отверстия и выемки.

Ситаллы — плотные материалы (цвет от белого до коричневого), обладающие повышенной механической прочностью и химической стойкостью, высокими диэлектрическими и температурными свойствами, что дает возможность применять их для многих приборов электронной техники, работающих в широком диапазоне частот. Удельное объемное сопротивление $10^8 \dots 10^{12}$ Ом·м, тангенс угла диэлектрических потерь $(10 \dots 800) \cdot 10^{-4}$ при частоте 10^6 Гц.

По техническому назначению ситаллы подразделяют на установочные и конденсаторные. *Установочные ситаллы* используются в качестве подложек гибридных интегральных микросхем и пассивных дискретных элементов (например, в тонкопленочных резисторах). Достоинство *ситалловых конденсаторов* — повышенная электрическая прочность по сравнению с керамическими конденсаторами.

Керамические материалы. *Керамика* — поликристаллические искусственные материалы, получаемые спеканием порошков тугоплавких неорганических соединений.

Керамический материал состоит из кристаллической, стекловидной и газовой фаз. *Кристаллическую фазу* образуют химические соединения или их твердые растворы. Основные свойства керамики (диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, температурный коэффициент линейного расширения, механическая прочность) в основном зависят от нее.

Стекловидная фаза — прослойки стекла, связывающие кристаллическую фазу, от ее количества зависят технологические свойства керамики (температура спекания, степень пластичности при формировании). От нее зависят также плотность, степень пористости и гигроскопичность материала. Некоторые виды радио-керамики не содержат этой фазы.

Газовая фаза (газы в закрытых порах) приводит к снижению механической и электрической прочности керамики. Ее количество зависит от способа переработки массы.

К достоинствам керамики относятся: возможность получения заранее заданных характеристик путем изменения состава массы и технологии производства; высокая теплостойкость; отсутствие у большинства материалов гигроскопичности; хорошие электрические характеристики при достаточной механической прочности; стабильность характеристик и надежность; стойкость к воздей-

ствию излучения высокой энергии, развитию плесени и поражению насекомыми.

Керамические материалы по техническому назначению подразделяются на установочные и конденсаторные.

Установочную керамику применяют для изготовления изоляторов и конструкционных деталей; опорных, проходных, подвесных, антенных изоляторов радиоустройств, подложек интегральных микросхем, ламповых панелей, внутриламповых изоляторов, корпусов резисторов, каркасов индуктивных катушек, оснований электрических печей.

Конденсаторная керамика идет на изготовление конденсаторов; из керамики изготавливают более 50 % всех конденсаторов.

По электрическим свойствам установочную и конденсаторную керамику подразделяют на низкочастотную и высокочастотную. Из низкочастотных установочных материалов наиболее распространен **изоляционный фарфор**. Сырьем для его изготовления служат специальные сорта глины, кварцевый песок и щелочной полевой шпат. При обжиге глина теряет кристаллизационную воду и, взаимодействуя с кварцем, образует основную кристаллическую фазу — муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Промежутки между кристаллическими зернами заполняются стекловидной фазой, возникающей за счет расплавления полевого шпата. Из-за большого содержания щелочных оксидов в стекловидной фазе материал обладает значительными диэлектрическими потерями, поэтому не применяется на высоких частотах.

Промежуточное положение между высокочастотными и низкочастотными диэлектриками занимает **радиофарфор**. Улучшение его электрических свойств по сравнению с изоляционным фарфором достигается путем введения в состав исходной шихты оксида бария, резко снижающей диэлектрические потери и проводимость стекловидной фазы.

Дальнейшим усовершенствованием радиофарфора является **ультрафарфор**, относящийся к группе материалов с высоким содержанием глинозема (более 80 %).

Ультрафарфор является высокочастотным диэлектриком, в котором сочетаются низкие диэлектрические потери с высокой механической прочностью и удовлетворительными для промышленного производства технологическими параметрами. Такое сочетание свойств во многом объясняется наличием в нем бариевого стекла, которое, с одной стороны, способствует улучшению электрических свойств материала, а с другой — ускоряет спекание, образуя жидкую фазу в процессе обжига. В результате удается по-

лучить плотную керамику при относительно невысоких температурах спекания (1 360... 1 370 °С).

Спектр керамических электротехнических материалов постоянно расширяется. В последние годы большое внимание уделяется созданию нанокерамических материалов. В частности, из них получены изоляторы для вакуумных дугогасительных камер, электронно-оптические преобразователи в приборах ночного видения.

3.3.6. Активные диэлектрики

Сегнетоэлектрики. Это диэлектрики, обладающие самопроизвольной поляризацией в отсутствие внешнего электрического поля. При небольшом изменении приложенного электрического поля происходит существенное изменение поляризации вещества, которое обнаруживается по току, возникающему в некоторой цепи, присоединенной к электродам кристалла. Таким образом, сегнетоэлектрики — это материалы, способные изменять сопротивление при наложении электрического поля.

В большинстве своем наиболее типичные представители сегнетоэлектриков (титанаты бария, стронция, свинца) являются сложными оксидами. Особенностью их строения является нарушение кубической симметрии в расположении заряженных частиц при температурах ниже определенных значений. Такая температура получила название *точка Кюри*. Нарушение симметрии приводит к появлению электрического момента у элементарной ячейки и образованию доменной структуры (рис. 3.4).

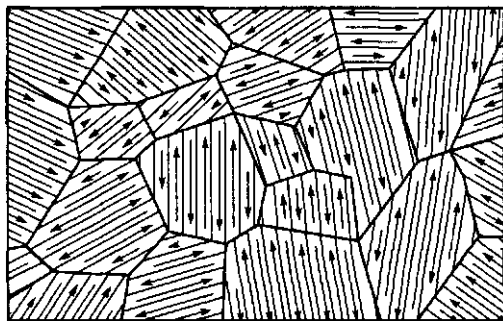


Рис. 3.4. Схема расположения доменов в кристалле сегнетоэлектрика

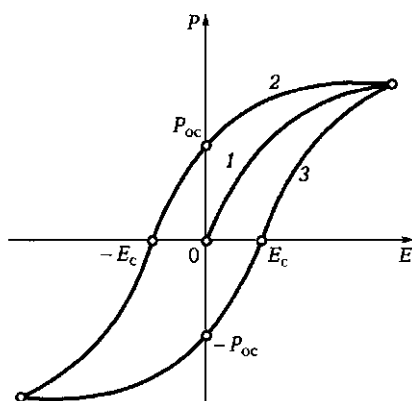


Рис. 3.5. Основная кривая поляризации сегнетозлектрика (1) и петля гистерезиса (2, 3)

Разбиение на домены уменьшает электростатическую энергию сегнетозлектрика. Установлено, что линейные размеры доменов составляют от 10^{-4} до 10^{-1} см.

Характерными признаками сегнетозлектриков являются:

- сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости, зависящие от внешнего электрического поля;
- потеря своих свойств выше некоторой температуры T_k , называемой температурой перехода (Кюри). В окрестности T_k диэлектрическая проницаемость резко возрастает до больших значений;
- нелинейная зависимость поляризации от напряженности электрического поля (рис. 3.5).

Кривую 1 называют основной кривой поляризации сегнетозлектрика (кривая заряда сегнетозлектрического конденсатора). При увеличении напряженности внешнего поля разрастаются домены с преимущественной ориентацией, у которых вектор спонтанной поляризации образует наименьший угол с направлением поля. При некоторой напряженности поля все домены оказываются ориентированными по полю. Наступает состояние технического насыщения. В монокристаллах состояние технического насыщения соответствует однодоменному состоянию.

Если в поляризованном до насыщения образце уменьшить напряженность поля до нуля, то поляризация не обратится в ноль, а примет некоторое остаточное значение $P_{ос}$. При воздействии полем противоположной полярности поляризация быстро уменьша-

ется и при некоторой напряженности — E_c поля изменяет свое направление. Дальнейшее увеличение напряженности поля переводит образец в состояние технического насыщения. Отсюда следует, что переполяризация сегнетоэлектрика в переменных полях сопровождается диэлектрическим гистерезисом. Напряженность поля E_c , при которой поляризация проходит через ноль, называется *коэрцитивной силой*.

Причиной диэлектрического гистерезиса является необратимое смещение доменных границ под действием поля и затраты энергии на ориентацию доменов, что приводит к дополнительным диэлектрическим потерям. Площадь гистерезисной петли пропорциональна энергии, рассеиваемой в диэлектрике за один период. Вследствие потерь на гистерезис сегнетоэлектрики характеризуются значительным тангенсом угла диэлектрических потерь $\approx 0,1$.

Использование сегнетоэлектриков в технических целях постоянно возрастает. Можно выделить несколько основных направлений их применения:

- изготовление низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью, имеющих малые размеры;
- в диэлектрических усилителях, модуляторах и других управляемых устройствах;
- сегнетоэлектрики с прямоугольной петлей гистерезиса могут использоваться в счетно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти;
- для модуляции и преобразования лазерного излучения.

Пьезоэлектрики. Различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.

Прямой пьезоэлектрический эффект — поляризация диэлектрика под действием механических напряжений.

Возникающий на каждой из поверхностей диэлектрика электрический заряд линейно зависит от механических усилий. Коэффициент пропорциональности называется *пьезомодуль*. Он равен заряду, возникающему на единице поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему единицы давления. Значение пьезомодуля используемых в практике пьезоэлектриков около 10^{-10} Кл/Н.

Пьезоэлектрический эффект обратим. При **обратном электрическом эффекте** происходит линейное изменение размеров диэлектрика при изменении напряженности электрического поля.

Пьезомодули прямого и обратного пьезоэффектов для одного и того же материала равны между собой, что доказывается в термодинамике.

Деформация пьезоэлектрика зависит от направления электрического поля и меняет знак при изменении направления последнего. При приложении к пьезоэлектрику синусоидального электрического поля у него возникают синусоидальные деформации той же частоты.

Пьезоэффект наблюдается лишь в веществах с гетерополярной химической связью, т.е. пьезоэлектриками могут быть либо ионные, либо сильнополярные диэлектрики. Кроме того, структура диэлектрика должна быть несимметричной, иначе деформация вызывает симметричное смещение положительных и отрицательных зарядов, и электрический момент не возникает. Пьезоэлектриками могут быть лишь вещества с высоким удельным электрическим сопротивлением, поскольку в проводящих средах поляризация быстро компенсируется свободными носителями заряда. Но любой диэлектрик обладает некоторым током утечки, поэтому применение пьезоэффекта связано с быстропротекающими процессами.

Известно более тысячи веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, среди них все сегнетоэлектрики. Практическое применение находит ограниченный круг материалов. Среди них **монокристаллический кварц** — полиморфная модификация диоксида кремния. Если температура выше 573 °С, тип структуры изменяется и пьезосвойства исчезают.

Широко применяется и сегнетоэлектрическая керамика. В обычном состоянии она изотропна и не проявляет пьезоактивности вследствие хаотического расположения отдельных кристаллических зерен и деления их на домены с различным направлением спонтанной поляризации. После воздействия сильного электрического поля, происходит преимущественная ориентация электрических моментов доменов в одном направлении. Она сохраняется после снятия поля, и материал становится текстурированным.

Для придания пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 переводят в монокристаллическое состояние путем отжига в сильном электрическом поле при температуре несколько ниже точки Кюри.

Для создания мощных ультразвуковых излучателей в широком диапазоне частот используют твердые растворы $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (цирконат — титанат свинца (ЦТС)). Такие ультразвуковые генераторы применяют в гидроакустике, дефектоскопии, механической обработке материалов, в химической промышленности для ускорения различных процессов (эмульсификаторы, полимеризаторы,

стерилизаторы) и в полупроводниковой технологии для эффективной отмывки и обезжиривания полупроводниковых пластин с помощью ультразвуковой ванны.

Из пьезокерамики делают малогабаритные микрофоны, телефоны, высокочастотные громкоговорители, слуховые аппараты, детонаторы для оружия, устройства розжига в газовых системах; используют в качестве датчиков давления, деформации, ускорения и вибрации. Двойное преобразование энергии (электрической в механическую и наоборот) используется в работе пьезорезонансных фильтров, линий задержки и пьезотрансформаторов.

Пирозлектрики. *Пирозлектрики* — диэлектрики, в которых происходит изменение спонтанной поляризации при изменении температуры.

Если температура диэлектрика не меняется, его спонтанный электрический момент скомпенсирован свободными зарядами противоположного знака заряженных частиц из окружающей атмосферы. Компенсация происходит вследствие электропроводности или адсорбции заряженных частиц. Изменение спонтанной поляризации приводит к освобождению заряда на поверхности диэлектрика, и в замкнутой цепи возникает электрический ток.

Изменение спонтанной поляризации при изменении температуры происходит вследствие нарушения упорядоченности в расположении элементарных дипольных моментов (первичный или истинный пирозэффект), а также из-за изменения линейных размеров диэлектрика и связанной с этим пьезоэлектрической поляризации (вторичный пирозэффект).

Пирозлектрическими свойствами обладают все сегнетоэлектрические материалы и некоторые линейные диэлектрики (например, турмалин, сульфат лития). У линейных пирозлектриков направление спонтанной поляризации не может изменяться с помощью внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрики проявляют пирозлектрические свойства только в монокристаллическом состоянии, т. е. когда электрические моменты всех доменов направлены одинаково. В поликристаллическом образце суммарная поляризация равна нулю, и пирозэффект отсутствует. Получение монокристаллического сегнетоэлектрика происходит при выдержке его в постоянном электрическом поле при температуре немного ниже точки Кюри.

Пирозэффект в сегнетоэлектриках применяют в тепловых датчиках и приемниках лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения, сенсорных устройствах различного назначения, датчиках теплотемперических приборов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие сплавы обладают высоким сопротивлением и где их используют?
2. Приведите примеры неметаллических проводящих материалов и оцените их специализированное назначение.
3. Что такое собственный полупроводник?
4. Объясните принцип деления полупроводников на *n*-типа и *p*-типа.
5. Что такое поляризация диэлектрика? Какие существуют виды поляризации?
6. Назовите основные виды органических и неорганических пассивных диэлектриков.
7. В чем сходство и различие сегнето-, пиро- и пьезоэлектриков?

ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ

Термической обработкой называется процесс тепловой обработки металлов и сплавов с целью изменения их структуры и свойств в нужном направлении. Он заключается в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью. Термическая обработка применяется как промежуточная операция для улучшения технологических свойств металла и как окончательная — для придания ему комплекса механических, физических и химических свойств, обеспечивающих необходимые характеристики изделия.

Химико-термической обработкой (ХТО) называется тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев металла. В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяется также его фазовый состав и микроструктура.

4.1. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ НАГРЕВЕ

4.1.1. Превращения перлита в аустенит

Рассмотрим левую нижнюю часть диаграммы состояния железо — углерод. Для превращения фаз свободная энергия новой фазы должна быть меньше свободной энергии старой фазы. Поэтому при нагреве стали выше температуры 727°C , соответствующей линии *PSK* (см. рис. 1.11), перлит превращается в аустенит (перенагрев). При охлаждении стали ниже этой точки (переохлаждение) идет обратное превращение.

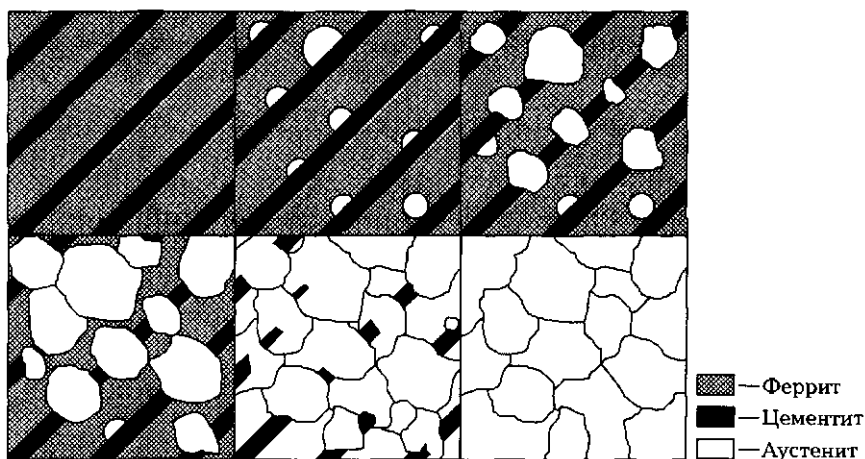


Рис. 4.1. Схема превращения перлита в аустенит

При нагреве эвтектоидной стали (0,8 % углерода) превращение перлита в аустенит происходит следующим образом (рис. 4.1). В исходном состоянии сталь представляет собой смесь феррита и цементита. При нагреве выше 727°C на границе фаз начнется превращение $\alpha \rightarrow \gamma$. Появляется низкоуглеродистый аустенит, в котором растворяется цементит. Переход $\alpha \rightarrow \gamma$ происходит быстрее, чем растворение цементита. Поэтому образование цементита идет с неравномерной концентрацией углерода (уменьшение концентрации от центра зерна к его периферии). После повышения температуры или дополнительной выдержки, за счет диффузии углерода, цементитные зерна станут однородными по всему объему.

В доэвтектоидных сталях, при наличии свободного феррита, начальная неоднородность цементита будет еще больше, так как избыточный феррит превращается в аустенит при более высокой температуре, чем идет превращение $\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \gamma$. С повышением температуры скорость превращения $\alpha \rightarrow \gamma$ увеличивается, так как ускоряется диффузионный процесс.

4.1.2. Рост зерна аустенита при нагреве

При нагреве стали выше 727°C получаются мелкие зерна аустенита. Далее мелкие зерна срастаются в большие (большие зерна имеют меньшую свободную энергию).

Склонность зерна к росту с повышением температуры у сталей различна. По этой склонности различают наследственно мелко-

зернистые и наследственно крупнозернистые стали. Наследственно мелкозернистыми сталями являются стали, раскисленные алюминием, образующие дисперсионные частицы нитрида алюминия (AlN). Эти частицы, располагаясь по границам зерен, образуют барьер, препятствующий их росту. Однако при повышении температуры частицы нитрида алюминия растворяются и резко увеличиваются размеры зерен. Рост зерен сдерживается нерастворившимися карбидами (особенно карбидами Ti , V , Mo , Nb , Al). Стали, раскисленные кремнием или марганцем, являются наследственно крупнозернистыми.

4.2. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

4.2.1. Распад переохлажденного аустенита

Распад аустенита происходит при температуре ниже $727^{\circ}C$ (точка A_1). Если нагретую до состояния аустенита сталь быстро охладить до температуры ниже точки A_1 , то какое-то время аустенит сохраняется нераспавшимся (инкубационный период). При выдержке стали начнется распад аустенита на ферритно-цементитную смесь. Минимальное время существования переохлажденного аустенита до начала его распада называют **устойчивостью аустенита**, оно зависит от процентного содержания углерода и легирующих добавок.

Перлитное превращение. Перлит — продукт эвтектоидного распада аустенита при температурах $650 \dots 700^{\circ}C$. Эвтектоидный распад аустенита в перлит — диффузионный процесс, т.е. происходит путем возникновения и роста зародышей. При температуре ниже точки A_1 в неравновесном аустените (рис. 4.2) углерод диффундирует к дефектным местам кристаллической решетки, к местам скопления вакансий вблизи границ зерен. Зародыши цементита образуются по границам зерен аустенита. Диффузия углерода приводит к обеднению аустенита, окружающего новые пластинки цементита (рис. 4.3). Решетка из ГЦК превращается в ОЦК. Поэтому рядом с пластинками цементита образуются пластинки феррита. Дальнейшее утолщение пластинок феррита ведет к обогащению окружающего аустенита углеродом. Зарождаются новые или растут старые пластинки цементита. Возникают так называемые перлитные колонии, в которых перлитные пластинки распо-

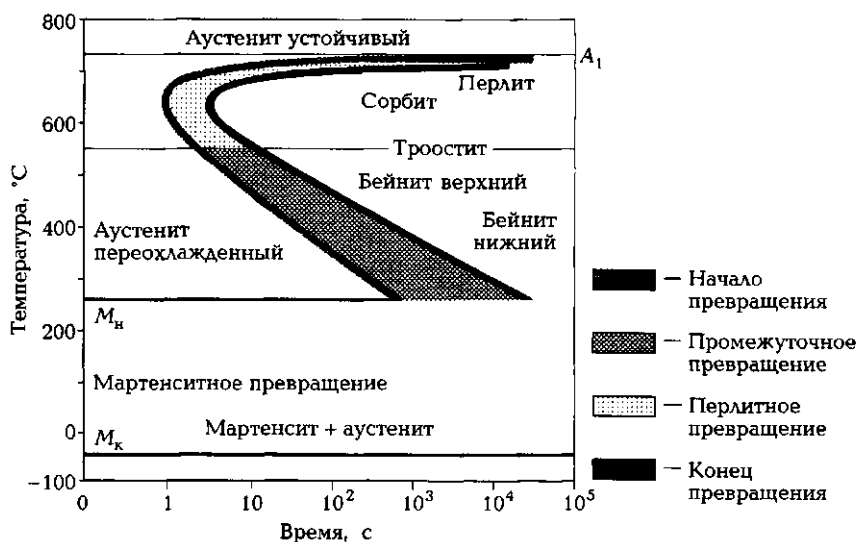


Рис. 4.2. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали (С-кривая):

A_1 — граница устойчивого аустенита; M_n , M_k — границы соответственно начала и конца мартенситного превращения

ложены параллельно. Далее пластинки удлиняются, колонии растут до столкновения друг с другом. Весь аустенит превращается в перлит. При переохлаждении аустенита до $600 \dots 650^\circ\text{C}$ образуется более мелкая ферритно-цементитная смесь, называемая **сорбитом**. При переохлаждении аустенита до $500 \dots 600^\circ\text{C}$ образуется еще более мелкая ферритно-цементитная смесь, называемая **трооститом**. Перлитная область распространяется от точки A_1 (граница устойчивого аустенита) до точки перегиба диаграммы изотермического превращения стали (см. рис. 4.2).

Мартенситное превращение. При большом переохлаждении углерод не успевает выделиться из твердого раствора. Происходит перестроение решетки железа: $\gamma \rightarrow \alpha$. Углерод остается внутри ре-

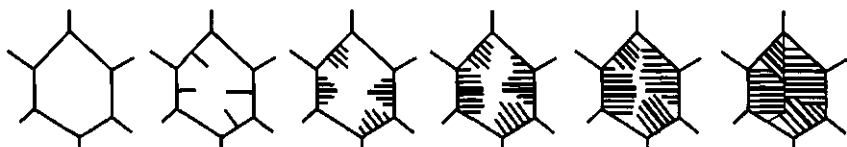


Рис. 4.3. Схема образования перлитных зерен в зерне аустенита

шетки Fe_α . Пресыщение углеродом приводит к перестроению решетки в прямоугольный параллелепипед. Полученный твердый раствор внедрения называется *мартенситом*.

Диаграмма изотермического превращения стали показывает влияние температуры на распад аустенита. По внешнему виду ее называют С-кривая (см. рис. 4.2).

В зависимости от степени переохлаждения различают три температурные области превращения аустенита: перлитную, промежуточную и мартенситную.

Превращение аустенита в мартенсит начинается в точке M_n и заканчивается в точке M_k (см. рис. 4.2). Характерным для данного превращения является следующее:

- не происходит полного превращения аустенита в мартенсит (остаточный аустенит);
- при остановке охлаждения и выдержке при постоянной температуре выделение мартенсита прекращается. При последующем охлаждении увеличивается стойкость оставшегося аустенита против мартенситного превращения. Следовательно, в интервале температур $M_n - M_k$ аустенит стабилизируется;
- интервал $M_n - M_k$ зависит от концентрации углерода в аустените. При содержании углерода более 0,6 % превращение заканчивается при отрицательных температурах. Поэтому, для того чтобы в высокоуглеродистых сталях получить большое количество мартенсита, их следует охлаждать до отрицательных температур.

Бейнитное превращение. Область бейнитного превращения — от 550°C до точки M_n . При изотермической выдержке в этой области образуется бейнит (игльчатый троостит). Это превращение сочетает элементы перлитного и мартенситного превращений. Микроструктура и механические свойства бейнита зависят от температуры выдержки. При более высокой температуре образуется верхний бейнит, имеющий перистое строение, напоминающее строение перлита. При более низкой температуре образуется нижний бейнит, имеющий игльчатое строение, похожее на строение мартенсита. Твердость нижнего бейнита немного выше.

4.2.2. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении

Термическая обработка обычно производится при непрерывном охлаждении сталей, нагретых до аустенитного состояния. Диаграмму превращений аустенита при непрерывном охлаждении

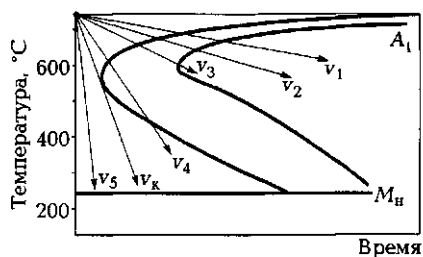


Рис. 4.4. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита:

A_1 — граница устойчивого аустенита; M_n — граница начала мартенситного превращения; $v_1—v_5$ — скорости охлаждения; v_k — критическая скорость охлаждения

(рис. 4.4) получают наложением на диаграмму изотермического распада переохлажденного аустенита кривых охлаждения.

При небольшой скорости охлаждения v_1 линия охлаждения пересекает линии диаграммы превращений при высоких температурах и малом переохлаждении. Продуктом превращений будет перлит. С увеличением скорости охлаждения (линии v_2 и v_3) понижается температура и увеличивается переохлаждение. Продуктами превращений будут сорбит и троостит. При скорости v_4 полного превращения аустенита в ферритно-цементитную структуру не происходит, часть его переохлаждается до M_n . Образуется структура, состоящая из троостита и мартенсита. Кривая v_k , касательная к С-кривой, показывает критическую скорость закалки, при которой образуется мартенсит без продуктов перлитного распада. При повышении скорости (v_5) образуется только мартенсит.

Следовательно, изменяя скорость охлаждения, можно получать различные структуры сталей, в этом и состоит цель термической обработки.

4.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

К основным видам термической обработки относятся следующие.

Закалка — нагрев стали выше температуры начала мартенситного превращения с последующим охлаждением со скоростью выше критической (обычно в воде). Цель закалки — получение мартенситной структуры.

Отжиг — нагрев стали выше температуры начала мартенситного превращения с последующим очень медленным охлаждением (чаще всего вместе с печью). Цель отжига — получение равновесной структуры перлита с избыточными фазами феррита или цементита.

Нормализация — нагрев стали выше температуры начала мартенситного превращения с последующим охлаждением на воздухе. Скорость охлаждения выше, чем при отжиге. Структура — дисперсный перлит (сорбит).

Отпуск — нагрев закаленной стали до температуры ниже точки A_1 с последующим охлаждением. Цель отпуска — превращение мартенсита и остаточного аустенита в более стабильное состояние (ферритно-цементитную смесь).

В зависимости от требуемого комплекса свойств закаленные стали подвергают низкому (до 200°C), среднему ($450 \dots 500^\circ\text{C}$) и высокому ($550 \dots 650^\circ\text{C}$) отпуску. При низком отпуске в результате незначительного распада мартенсита и выделения карбидов уменьшаются внутренние напряжения в заготовке, несколько возрастает вязкость, уменьшается склонность к хрупкому разрушению, но сохраняется высокая твердость. С повышением температуры отпуска твердость и прочность снижаются, а пластичность и вязкость повышаются. При высоком отпуске получается структура сорбита с зернистой формой цементита. В результате сталь будет обладать большей пластичностью. Поэтому высокий отпуск называют *улучшением*.

Основными видами химико-термической обработки являются следующие.

Цементация (науглероживание) — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом. Обычно цементацию проводят при температуре $930 \dots 950^\circ\text{C}$, когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в большом количестве. Окончательные свойства (повышенную твердость) получают после последующей закалки и низкого отпуска.

Нитроцементация — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре $840 \dots 860^\circ\text{C}$ в газовой среде науглероживающего газа и аммиака. Назначение нитроцементации — повышение твердости, износостойкости и прочности стальных заготовок.

Азотирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали азотом. В результате сильно повышается твердость, износостойкость и сопротивление коррозии поверхностного слоя. Твердость поверхностного слоя значительно выше, чем при цементации, и сохраняется при повышенных температурах ($450 \dots 500^\circ\text{C}$).

Цианирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 820...950 °С в расплавленных слоях, содержащих группу NaCN. Цианирование позволяет повысить износостойкость поверхностного слоя по сравнению с цементацией.

4.4. ПРИМЕРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Объемную закалку с последующим отпуском широко применяют в машиностроении.

Стали с содержанием углерода 0,5...0,6 % обычно подвергаются объемной закалке с низким отпуском (табл. 4.1). При этом повышение прочности сопровождается уменьшением сопротивления хрупкому разрушению и порога хладноломкости.

Объемной закалке и среднему отпуску подвергают упругие элементы машин (табл. 4.2). Наибольшие упругие свойства достигаются при сквозной прокаливаемости. Критический диаметр прокаливаемости стали 50С2 составляет 12...16 мм, для сталей 60С2, 60С2ХА, 60С2ХФА при закалке в масле — соответственно 20, 45, 80 мм.

Большинство конструкционных сталей с содержанием углерода 0,3...0,5 % подвергаются закалке и высокому отпуску (табл. 4.3).

Таблица 4.1. Типовые детали машин, подвергаемые объемной закалке и низкому отпуску

Тип детали	Марка стали	HRC
Подшипники, толкатели, ходовые винты	ШХ15, 7ХГ2ВМ	60...65
Клапаны, плунжеры, кулачки	ХВГ, 7ХГ2ВМ	55...60
Метизы	35, 45, 40Х, 35ХМ, 30ХГСА	40...50
Оси, валики, копиры	40ХН, 40ХН2МА	45...55
Валы, оси, вилки, зубчатые колеса	45, 40Х, 50Х	40...55

Примечание. Закалка в масле при температуре 830...860 °С, отпуск при температуре 150...240 °С в течение 1...3 ч.

Таблица 4.2. Типовые детали машин, подвергаемые объемной закалке и среднему отпуску

Тип детали	Марка стали	HRC
Пружинные шайбы, тарельчатые пружины, стопорные кольца	50, 55, 65, 65Г, 50С2	40...50
Пружины	60, 65Г, 70Г, 55С2	35...50
Рессорные листы, реактивные тяги	60С2ВА, 50ГФА	40...50
Плоские пружины	60Г, 60С2, 60С2А	45...50
Торсионные валы, кольца амортизаторов	60С2, 60С2ВА	40...50

Поверхностной закалке при индукционном нагреве подвергаются детали машин, испытывающие в работе изгиб, кручение и контактные напряжения. Индукционная поверхностная закалка повышает предел выносливости на 50...70 %.

К основному недостатку данного метода обработки относится его малая гибкость (необходимость изготовления индуктора и

Таблица 4.3. Типовые детали машин, подвергаемые объемной закалке и высокому отпуску

Тип детали	Марка стали	HB
Метизы, втулки, вилки, стяжки	35, 45	207...242
Карданные валы, шатуны, тяги, ступицы	45, 40Х	240...320
Оси, валы, шестерни, штоки	45Х	210...260
Шестерни распределительных механизмов, поперечные тяги, поворотные сошки, шатуны	45, 35Х, 45Х, 40ХН, 40ХН2МА, 20ХГТР	240...286
Нагруженные валы, штоки, рейки, шлицевые валы	40Х, 50Х, 40ХФА	210...290
Ответственные валы и шестерни	38ХН3МФА	293...331
	36Х2Н2МФА	277...321
	34ХНМ	277...321
	34ХН3М	293...331

Примечание. Рекомендованные условия отпуска:

Температура отпуска, °С	400	520	600	620	650
Временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$, МПа.....	1 550	1 300	1 200	1 150	1 000

охлаждающих устройств, соответствующих конкретной детали), что ограничивает его применение в единичном и мелкосерийном производстве.

Рекомендации по применению поверхностной закалки при индукционном нагреве приведены в табл. 4.4.

Если к зубчатым колесам не предъявляются высокие требования по износостойкости, их изготавливают из сталей 40, 45, 40Х, 40ХС и упрочняют закалкой с высоким отпуском и последующей поверхностной закалкой при индукционном нагреве на глубину 1,5...2,5 мм и 50...55 HRC.

Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения, применяется к деталям, работающим в условиях повышенного износа, которые должны обладать высокой прочностью на изгиб, высокой усталостной прочностью.

Цементация на глубину 0,5...2 мм или нитроцементация на глубину 0,4...0,8 мм и последующая закалка в сочетании с низким отпуском повышают предел выносливости на 50...80 %, износостойкость в 3—10 раз. Наиболее часто цементации и нитроцементации подвергают зубчатые колеса.

Применяемые в машиностроении стали и методы упрочнения зубчатых колес можно классифицировать по степени нагруженно-

Таблица 4.4. Типовые детали машин, упрочняемые закалкой при индукционном нагреве

Тип детали	Марка стали	Толщина закаленного слоя, мм	HRC	Примечание
Коленчатые валы	45 50Г	2,6...6,5 3...4	50...60 50...60	Предварительная нормализация
Распределительные валы	45	2...3	55...60	Обрабатываются кулачки
Червяки, втулки шатунов, ролики, оси коромысел	45	1...2,5	55...60	—
Тонкие оси	45	4	55...60	Закалка в вертикальном положении
Зубчатые муфты	50ХМ	1,5	55...60	Закалка зубьев
Цилиндрические шестерни	58	1...2,5	55...65	Закалка зубчатого венца

сти этих колес. Мало- и средненагруженные колеса изготавливают из сталей 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГНР, 20ХНР. Заготовки упрочняют цементацией на глубину 1,2...1,8 мм; твердость поверхности 55...65 HRC, сердцевины — 25...40 HRC. Тяжелонагруженные колеса изготавливают из сталей 20ХГНР, 20ХНР, 20ХНЗА. Заготовки подвергают нитроцементации. Толщина упрочненного слоя — 1,0...2,0 мм; твердость поверхности 55...65 HRC, сердцевины — 30...45 HRC.

Детали, склонные к короблению (зубчатые колеса с внутренним венцом, детали топливной аппаратуры, клапаны, штоки клапанов, гильзы цилиндров, форсунки, тарелки, буксы, плунжеры и др.), изготавливают из хромистых или хромистованадиевых сталей и подвергают азотированию; глубина азотирования не более 0,6 мм.

4.5. ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

4.5.1. Поверхностное лазерное легирование стальной поверхности

Поверхностное лазерное легирование (ПЛЛ) — химико-термическая обработка, при которой легирующие элементы добавляются в оплавленную зону для изменения состава поверхности.

Процесс ПЛЛ требует совместного плавления легирующего компонента и основной матрицы. После совместного плавления предварительно нанесенного слоя и основы образуется модифицированный поверхностный слой со свойствами нового сплава. При этом легированный слой можно создавать в локальном месте, нет необходимости в объемном упрочнении всей детали, не происходит разогрева, поводок и короблений.

Проводят ПЛЛ составами, содержащими бор и вольфрам. Вольфрам как карбидообразующий элемент, придает легированной поверхности значительную теплостойкость, а бориды железа обладают высокой твердостью при нормальных и повышенных температурах и повышенной сопротивляемостью износу.

Лазерное оплавление нанесенной на поверхность изделия обмазки (порошкообразного легирующего компонента на спиртовом связующем) проводится в защитной среде аргона. Основные параметры процесса:

- мощность лазера — 0,9...1 кВт;

- скорость перемещения — 160...200 мм/мин;
- диаметр пятна фокусировки — 1,5 мм.

Предпочтительное фокусное расстояние объектива лежит в диапазонах 150...300 мм и требует заглупления фокуса под поверхность нанесенного покрытия на расстояние 1...1,5 мм.

Структура поверхностного легированного слоя глубиной 0,3...0,5 мм состоит из пересыщенной α -фазы, мелкодисперсных боридов вольфрама (W_2B_5), а также боридов железа (Fe_2B и Fe_3B) с микротвердостью до 13 тыс. МПа.

В результате проведения поверхностного лазерного легирования существенно повышается теплостойкость стали, микротвердость поверхностного слоя достигает 12...14 тыс. МПа. При температуре отпуска до 650 °С микротвердость снижается до 11 тыс. МПа, а после 4-часового отпуска при температуре 750 °С микротвердость падает до 7 тыс. МПа. Снижение твердости можно объяснить наличием остаточного аустенита, количество которого можно уменьшить последующим низкотемпературным отпуском или обработкой холодом.

В пределах субструктуры остаточный аустенит частично трансформируется в мартенсит, в результате микротвердость повышается до 15...20 тыс. МПа, а последующий низкотемпературный отпуск с быстрым охлаждением предотвращает хрупкость легированного слоя.

4.5.2. Циркуляционный метод химико-термической обработки

Химико-термическая обработка в порошковых и газовых смесях, расплавах солей имеет следующие недостатки:

- нарушается экология окружающей среды за счет выделения избыточных газов из контейнеров при нагреве до температур диффузионного насыщения;
- образование остатков продуктов сжигания.

Поэтому в настоящее время наиболее перспективным является диффузионное насыщение различными элементами циркуляционным методом. При циркуляционном методе в замкнутом рабочем пространстве установки диффундирующие элементы переносятся при систематическом восстановлении газа-переносчика в результате обратимых химических реакций. Этот метод позволяет получать качественные диффузионные многокомпонентные слои в химически чистой газовой смеси без выхода газов в окружающую атмосферу.

4.5.3. Ионная химико-термическая обработка

Сущность ионной химико-термической обработки заключается в том, что в разреженной газовой среде между катодом (изделием) и анодом (стенкой вакуумной камеры) возбуждается тлеющий разряд, при этом вследствие ионизации рабочего газа, содержащего легирующие элементы (азот, бор), непрерывно образуются новые носители положительно заряженных частиц, которые диффундируют в глубь изделия.

Таким образом, ионная химико-термическая обработка и циркуляционный способ диффузионного насыщения являются хорошо управляемыми, экологически чистыми технологическими процессами, которые можно применять для обработки деталей, изготовленных из любых сталей, чугунов и многих сплавов.

4.5.4. Ионно-плазменное азотирование

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) — процесс, который осуществляется в плазме тлеющего разряда, созданного в низком вакууме ($\approx 1\,000$ Па), в азотосодержащей среде. В качестве рабочего газа используют азотно-водородную смесь (обработка чугуна и различных сталей) или чистый азот (обработка титана и его сплавов). Обработка производится при температуре $400\ldots 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от вида рабочего газа.

На поверхности обрабатываемого изделия создается азотированный слой, состоящий из двух зон: внешней нитридной и внутренней диффузионной.

Варьируя технологические режимы обработки (давление, температуру и период выдержки) можно получить:

- диффузионный слой с развитой нитридной зоной, обеспечивающей высокую сопротивляемость коррозии и прирабатываемость трущихся поверхностей;
- диффузионный слой без нитридной зоны, хорошо выдерживающий знакопеременные нагрузки в условиях изнашивания при высоких давлениях (режущий инструмент, штамповая оснастка).

4.5.5. Ионная имплантация

Ионная имплантация (ИИ) — способ введения атомов примесей в поверхностный слой обрабатываемого изделия за счет

бомбардировки его поверхности пучком ионов с высокой энергией (1 000... 2 000 кэВ).

Метод ИИ основан на использовании специальных источников ионов. В источнике создается полностью ионизированная плазма, затем с помощью ионно-оптических систем ионы вытягиваются из плазмы и ускоряются до энергии в диапазоне 5... 500 кэВ. Проникновение ускоренных ионов в глубину поверхности детали зависит от их энергии и составляет от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Ионы с энергией 1... 10 кэВ не вызывают изменений в структуре поверхности. При большей энергии ионного потока возможно поверхностное разрушение обрабатываемой детали.

Процесс ИИ позволяет ввести в поверхностные слои обрабатываемой детали любой элемент в строго контролируемом количестве, а также задавать его распределение по глубине. Однородность имплантации по площади обеспечивается сканированием ионного пучка или смещением детали.

Технологические режимы имплантации:

- энергия ионов — 0,1 мэВ; плотность ионного пучка — 10 мкА/см²;
- площадь обрабатываемой поверхности в пределах 1 см²;
- дозы имплантации — 10¹⁶ ион/см²;
- продолжительность имплантации в зависимости от дозы — 3... 30 мин.

Ионная имплантация азота применяется для упрочнения поверхности стальных режущих инструментов (фрезы, сверла и др.) и изделий, работающих в высокотемпературных агрессивных средах, например, при ИИ рабочих лопаток паровых турбин увеличиваются: предел усталости — на 7... 25 %, жаростойкость — в 1,5— 2 раза; коррозионная стойкость — в 1,4— 1,9 раза.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм превращения перлита в аустенит у эвтектоидной стали?
2. Что происходит с аустенитом при охлаждении стали ниже температуры 727 °С?
3. Что такое нормализация стали?
4. Что такое отпуск стали?
5. Что такое цементация стали?

ОСНОВЫ СЛЕСАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Слесарная обработка — размерная обработка материалов вручную или с помощью механизированного инструмента. Это трудоемкий, требующий высокой квалификации процесс. Слесарная обработка применяется при изготовлении деталей, сборке их в готовые изделия (слесарно-сборочные работы), ремонте машин и оборудования (слесарно-ремонтные работы), в основном в единичном и мелкосерийном производстве.

Качественное изготовление детали невозможно без знания условий ее работы в узле. Поэтому вначале слесарь изучает чертеж детали и сборочной единицы, готовит к работе необходимый инструмент и заготовку. Дальнейшая работа невозможна без определения баз.

5.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ

База — поверхность, линия, точка, определяющие положение детали в узле (или присоединяемых к ней деталей) при обработке или контроле. Различают базы конструкторские, технологические и измерительные.

Конструкторские базы назначаются при проектировании узла, определяют положение детали (присоединяемых к ней деталей) в узле.

Технологические базы определяют положение заготовки в приспособлении станка, относительно баз станка или режущего инструмента. При разметке технологические базы определяют поверхность, линию или точку, от которых откладывают размеры.

Измерительные базы определяют положение поверхностей детали относительно рабочих органов мерительного инструмента.

При разметке заготовок технологическую базовую поверхность (линию, точку) выбирают, руководствуясь следующими правилами. Желательно совпадение технологических и конструкторских баз. У заготовок с обработанными плоскими поверхностями за технологическую базовую поверхность принимают наибольшую обработанную поверхность, у цилиндрических заготовок или заготовок с отверстиями — плоскую поверхность, параллельную оси поверхности или оси отверстия, у заготовок с необработанными поверхностями — одну из наружных поверхностей.

5.2. ОСНОВНЫЕ СЛЕСАРНЫЕ ОПЕРАЦИИ

5.2.1. Правка

Правка — операция, предназначенная для устранения искажений формы заготовки (вмятины, выпучивания, волнистость, коробление, искривление и т.д.). Правке подвергается металл как в холодном, так и в горячем состоянии. Правку выполняют ручным способом (на стальной или чугунной плите или на наковальне), на правильных прессах или в правильных вальцах. Для ручной правки применяют молотки из мягких материалов (медь, свинец, твердые породы древесины) с круглым полированным бойком или гладилки и поддошки (металлические или деревянные бруски). Для ручной правки закаленных заготовок применяют молотки с закаленным фасонным бойком.

Кривизну заготовок проверяют на глаз, по зазору между плитой и уложенной на нее заготовкой. Изогнутые места отмечают мелом.

Правка сырого материала. Наиболее проста **правка изогнутой по плоскости полосы**. Молотком или кувалдой наносят сильные удары по наиболее выпуклым местам. По мере их выпрямления силу удара уменьшают. Заготовку периодически переворачивают.

Правку скрученных (спиральный изгиб) **полос** проводят методом раскручивания. Один конец заготовки зажимают в слесарных тисках, другой — в ручных. С помощью рычага раскручивают заготовку.

Правку стальной полосы, изогнутой на ребро, производят на плите. Удары молотком наносят по полосе рядами по всей длине полосы — от центра вогнутости к ее краям (рис. 5.1, а). Сила ударов уменьшается, а частота увеличивается при переходе от нижних к верхним слоям.

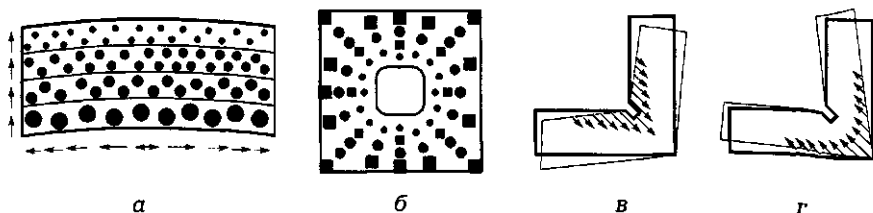


Рис. 5.1. Схемы правки материала:

а — стальной полосы; *б* — листового материала; *в, г* — закаленного угольника

Правка листового материала — более сложная операция. На заготовке обводят мелом выпуклые и волнистые места. Схема правки отдельной выпуклости показана на рис. 5.1, б. Удары молотком наносят от края листа к выпуклости. Во время правки лист поворачивают в горизонтальной плоскости так, чтобы удары равномерно распределялись кругами по всей площади заготовки. Сила ударов уменьшается, а частота увеличивается при переходе от периферии листа к центру выпуклости. При нанесении ударов по выпуклости металл вытягивается и выпуклость увеличивается. При наличии нескольких выпуклостей удары наносят в промежутке между ними. Лист равномерно растягивается, и все выпуклости сводятся к одной, которую затем правят. Если лист имеет волнистые края, то волнистость правят в первую очередь. Если лист имеет только волнистые края, то удары наносят от середины листа к краям. В результате лист в середине вытягивается, и волны по краям исчезают. Результаты правки проверяют на глаз, по просвету между разметочной плитой и заготовкой.

Тонкие листы металла правят деревянным молотком (киянкой) или при помощи текстолитовой накладки, которую кладут на выпуклые места и ударяют по ней молотком. Фольговые материалы кладут на ровную поверхность и проглаживают гладилкой, которая представляет собой ровную пластину с закругленными краями.

Правка закаленного материала. В результате внутренних напряжений заготовки, прошедшие закалку, деформируются. Искривленные полосы правят слесарным (масса 300...600 г) или рихтовочным молотком с вытянутым и закругленным бойком. Полосу укладывают на гладкую поверхность выпуклостью вниз. Наносят частые, но не сильные удары от центра вогнутости к ее краям. В результате вытягивания наружных слоев заготовка выпрямляется. Правка сложных заготовок, например угольников, показана на рис.

5.1, в, г. Направление и сила ударов показаны стрелками. Частые несильные удары наносят от центра вогнутости к ее краям.

5.2.2. Разметка

Разметка — нанесение на обрабатываемую поверхность разметочных линий (рисок), которые показывают границы обработки заготовки. Различают плоскостную и пространственную (объемную) разметку. Плоская разметка — нанесение внешнего контура детали на поверхность листовых материалов. При вычерчивании внешнего контура детали используют законы геометрических построений. Пространственная разметка осуществляется на поверхностях объемных заготовок, расположенных под различными углами друг к другу.

При разметке используется три вида инструмента: *инструмент для нанесения и накернивания рисок*: чертилки (рис. 5.2, а), рейсмасы одиночные или двоянные (рис. 5.2, б), штангенрейсмасы (рис. 5.2, в), разметочные циркули, кернеры (рис. 5.2, г); *инструмент для нахождения центров окружностей*: кернер-центроискатель, угольник-центроискатель и т.д.; *приспособления для разметки*: подкладки, домкраты, поворотные устройства, вертикальные стойки, делительные головки, центровые бабки и др.

Подготовка заготовки к разметке. Разметочные работы выполняют на специальных разметочных плитах из серого чугуна. Верхняя рабочая плоскость и боковые поверхности плиты должны быть обработаны шабрением, быть сухими и чистыми. По окончании работы плиту протирают тряпкой, смазывают и накрывают деревянным щитом — крышкой. Заготовки нельзя передвигать по плите, иначе появятся царапины и забоины. Плиту размещают на прочном виброустойчивом фундаменте, в наиболее освещенном месте, с общим вертикальным освещением.

Перед разметкой заготовку очищают стальной щеткой и шкуркой от коррозии, окалины и т.п. После изучения чертежа и сравнения реальных размеров заготовки с размерами детали определяют технологические базы. Далее готовят поверхности к окрашиванию. Чисто обработанные стальные поверхности окрашивают раствором медного купороса. После высыхания раствора на поверхности остается тонкий слой меди, на который хорошо наносятся разметочные линии. Чисто обработанные поверхности заготовок из цветных сплавов окрашивают быстросохнущими цветными лаками или красками. Необработанные поверхности окра-

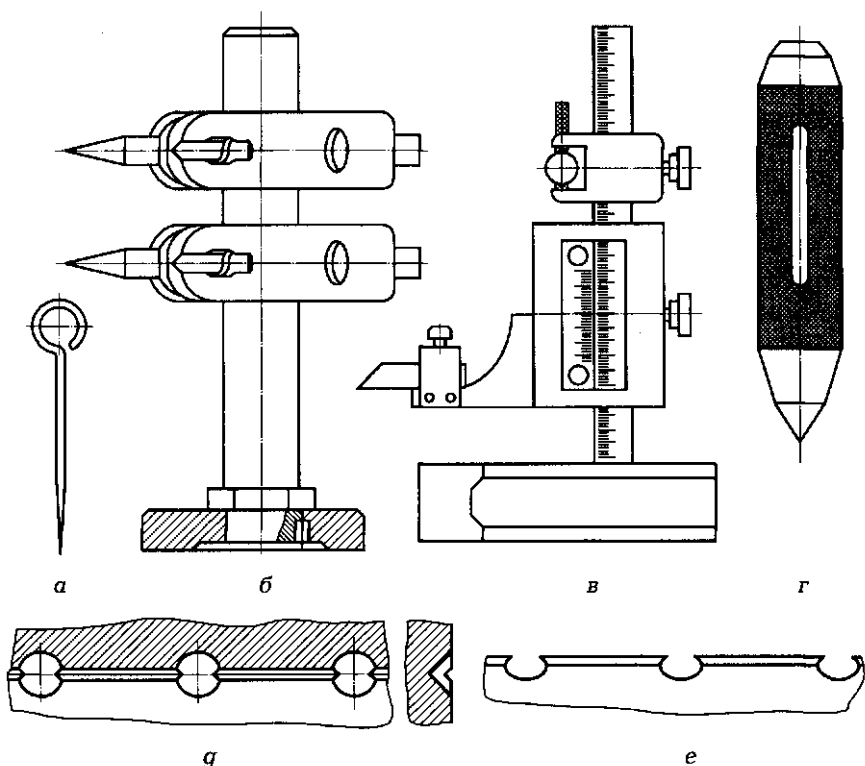


Рис. 5.2. Разметка заготовок:

a — чертилка; *б* — рейсмас сдвоенный; *в* — штангенрейсмас; *г* — кернер; *г* — разметочная линия до обработки; *е* — разметочная линия после обработки

шивают мелом, разведенным в воде до густоты молока с добавлением столярного клея или жидкого стекла. Если заготовка имеет полости, отверстия, в них забивают деревянные бруски или планки с пластинами из белой жести, латуни или свинца, на которых размечают центровые отверстия.

Приемы плоскостной разметки. Вначале наносятся все горизонтальные линии и риски, затем — все вертикальные, затем — наклонные. Последними наносятся окружности, дуги и сопряжения. Если в качестве технологической базы выбраны центровые риски, то разметку начинают с них. Разметка закончена, если изображение на плоскости полностью соответствует чертежу детали.

Прямые линии наносят чертилкой, наклоненной в сторону от линейки. Линейку или угольник плотно прижимают к заготовке,

проводят линию один раз, не прерывая движения руки. Если линия (риска) не получилась, ее закрашивают и проводят вновь. Деление окружности на равные части производят геометрическими построениями или с использованием специальных таблиц. Для разметки партии одинаковых деталей используют шаблоны, которые изготавливают из листовой стали. Конфигурация и размеры шаблона должны точно соответствовать чертежу детали.

Приемы пространственной разметки. Трудность пространственной разметки заключается в необходимости увязки разметки различных поверхностей друг с другом.

В качестве технологической базы выбирается поверхность, относительно которой можно разметить наибольшее число осей или плоскостей, установить главные оси заготовки, количество ее положений на плите и последовательность разметки. Заготовку прочно, без качания устанавливают на разметочную плиту так, чтобы каждая ось или плоскость детали были перпендикулярны общей плоскости плиты. Для установки и выверки заготовки используют призмы, опорные подкладки, домкраты, разметочные кубики и специальные приспособления (например, поворотные). Первую установку производят так, чтобы было удобно начать разметку от выбранной технологической базы.

Приемы пространственной разметки в основном совпадают с приемами плоскостной разметки.

Кернение разметочных рисков. После разметки линии накернивают. Кернер берут тремя пальцами левой руки (большим, указательным и средним). Острие кернера устанавливают точно на середину риски или на точку пересечения рисков. Перед ударом кернер немного отклоняют от себя, а в момент удара поворачивают вертикально. Размеченная и накерненная деталь до обработки и после показана на рис. 5.2, *g, e*.

5.2.3. Рубка и резка

Рубка заготовок производится с помощью специального режущего инструмента: зубила (рис. 5.3, *a*), крейцмейселя (рис. 5.3, *б*) или канавочника (рис. 5.3, *в*). Рубку производят в случаях, когда не требуется высокая точность обработки или когда деталь невозможно обработать на станке. При помощи рубки удаляют лишний слой металла с заготовки, разрубают заготовку на части, вырубают отверстия, прорубают смазочные канавки и т.п. Рубку мелких заготовок производят в тисках. Крупные заготовки рубят на плите или на наковальне.

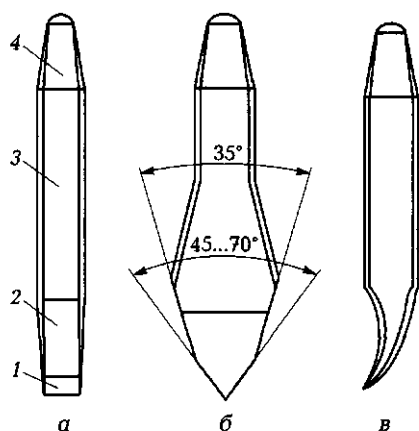


Рис. 5.3. Инструмент для рубки металла:

а — зубило: 1 — режущая кромка; 2 — рабочая часть; 3 — средняя часть; 4 — боек; *б* — крейцмейсель; *в* — канавочник

Слесарное зубило (см. рис. 5.3, *а*) состоит из трех частей: рабочей 2, средней 3 и ударной (бойка) 4. Клиновидную режущую кромку 1 и боек закалывают и отпускают (кромка — 56...61 HRC, боек — 37...41 HRC). Значения угла заострения режущей кромки приведены в табл. 5.1. Крейцмейсель отличается от зубила более узкой режущей кромкой. Он применяется для вырубания узких пазов. Канавочники отличаются изогнутой формой режущей кромки и рабочей части.

Качество и производительность рубки зависят от силы удара молотком и положения зубила. При кистевом ударе изгибается только кисть руки с молотком. Такой удар используется при выполнении точных и легких работ. При локтевом ударе рука изгибается в локте, и удар получается более сильным. При плечевом ударе рука изгибается в плече, удар получается очень сильным.

Таблица 5.1. Углы заострения режущей части

Обрабатываемый материал	Угол, ...°
Чугун, твердая сталь, бронза	70
Сталь средней твердости	60
Медь, латунь	45
Алюминиевые и цинковые сплавы	35

Частота ударов: при кистевом — 40—60 ударов в минуту, при локтевом или плечевом ударе — 30—40 ударов в минуту. Угол между заготовкой (верхней плоскостью губок тисков) и осью зубила должен составлять 45° , угол наклона зубила — $30 \dots 35^\circ$.

При рубке полосового или листового металла часть заготовки, уходящая в стружку, должна располагаться над губками тисков, а риска разметки — точно на уровне губок без перекосов. При срубании металла на широкой плоской поверхности разметочные риски должны выступать над губками на 5...10 мм. При этом вначале крейцмейселем прорубают канавки шириной 8...10 мм. Промежутки между канавками должны составлять 0,8 длины режущей кромки зубила. Затем зубилом срубают образовавшиеся выступы. При рубке хрупких материалов не доходят до противоположного края заготовки на 1,5...2 мм или на нем предварительно делают скос под углом 45° . При вырубании пазов и смазочных канавок сначала крейцмейселем прорубают канавку глубиной 1,5...2 мм за один проход. Затем оставшиеся неровности подчищают канавочником, им же придают пазу окончательную глубину, ширину и форму.

При вырубании фигурной заготовки из листового материала последнюю укладывают на плиту или наковальню. Вначале кистевыми ударами надрубают размеченный контур на глубину 2...3 мм. Далее лист рубят сильными локтевыми ударами. Если лист толстый, его переворачивают и окончательно прорубают с противоположной стороны. Ручная рубка — тяжелая и малопроизводительная операция. Для облегчения работы слесаря применяют пневматические молотки (рубильники или клепальники). Отечественной промышленностью выпускаются пневматические клепальники марок КЕ-16 — КЕ-32 массой 8...12 кг и облегченные клепальники МР-4 — МР-5 массой 4,2 кг.

Резка — разделение заготовки на части ручным или механическим способом. Ручную резку в зависимости от профиля заготовки и площади сечения производят ножовками, ножницами по металлу, труборезами, газопламенными горелками.

Наиболее распространена резка ручной ножовкой. Ножовка (рис. 5.4, а) состоит из рамки (станка) 2, в которой зажимается стальная пластина с зубьями (ножовочное полотно) 5. Ножовочное полотно вставляется в прорези неподвижной 3 и подвижной 6 призматических головок и штифтуется. Натяжение полотна осуществляется барашковой гайкой 1. Для уменьшения трения по боковым поверхностям зубья ножовочного полотна разводят в разные стороны. Разводку зубьев делают по зубу или по полотну.

В зависимости от инструментального материала, из которого сделано полотно, резку производят с определенной частотой: инструментальные углеродистые стали — не более 30 двойных ходов в минуту, инструментальные легированные стали — не более 60. При резке заготовку надежно зажимают в слесарных тисках, обеспечивая минимальное расстояние между линией губок и линией разреза. При резке тонких стальных заготовок или заготовок из мягкого материала ее зажимают между двумя деревянными брусками и распиловку производят вместе с ними. При резке толсто-стенных заготовок рез не доводят до конца на 3...5 мм. После резки заготовку обламывают.

При разрезании заготовок из материалов с низкой теплопроводностью (пластмассы) зону резания обязательно следует поливать водой или керосином.

Листовой материал разрезают ножницами по металлу. Для механизации процесса разрезания листового материала применяют электрические или пневматические ножницы.

Рабочая часть электрических ножниц показана на рис. 5.4, б. Ползун 4 размещен внутри корпуса 3 редуктора и вместе с подвижным ножом 6 совершает возвратно-поступательное движение. Неподвижный нож 2 установлен на улиткообразном держателе 7. Регулировка положения ножей осуществляется эксцентриком 5 и гайкой 1.

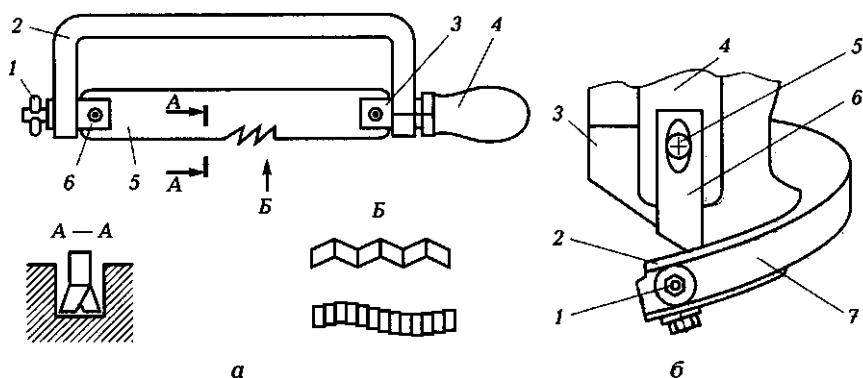


Рис. 5.4. Инструмент для резки металла:

а — ручная ножовка: 1 — гайка; 2 — рамка; 3 — неподвижная головка; 4 — рукоятка; 5 — ножовочное полотно; б — электрические ножницы: 1 — гайка; 2 — неподвижный нож; 3 — корпус редуктора; 4 — ползун; 5 — эксцентрик; 6 — подвижный нож; 7 — держатель

5.2.4. Опиливание и зачистка

Опиливание и зачистка — снятие слоя материала напильником, надфилем или абразивным инструментом. Обработка заготовок абразивным инструментом подробно описана в гл. 7.

Опиливание связано с изменением размеров заготовки, а зачистка — с уменьшением шероховатости или удалением ржавчины, рисок. Ручное опиление и зачистка — процесс трудоемкий и длительный. Механизация этих работ производится с помощью верстачных и передвижных установок с гибким валом, приводящим в движение специальные напильники или абразивные головки; переносных пневматических или электрических машинок, оснащенных шлифовальным кругом или щеткой; переносных электрических виброшлифовальных машинок с плоскими рабочими подушками; машин с абразивными лентами.

При ручном опиливании применяются разнообразные напильники — стальной закаленный брусок с режущими зубьями на рабочей части. У напильника (рис. 5.5, а) можно различить рабочую часть 2, хвостовик 3 с ручкой 4. Рабочая часть состоит из носа 1, ребер 7, граней 6 и пятки 5. Зубья напильника получают насечением или фрезерованием. Различают напильники с одинарной (простой), двойной (перекрестной), дуговой и перекрестной рашпильной насечками. Для обработки мягких материалов применяют напильники с простой насечкой, при обработке стали — с двойной насечкой. В зависимости от высоты зуба и числа насечек на 10 мм длины рабочей части различают напильники драчевые (№ 0, 1), личные (№ 2, 3), бархатные (№ 3, 4, 5). По форме тела различают напильники плоские, квадратные, круглые, полукруглые, треугольные, ромбические и ножовочные.

Надфили — небольшие напильники длиной 80...160 мм различной формы и поперечного сечения (рис. 5.5, б).

При слесарной обработке применяются специальные напильники и надфили: со специальной державкой, алмазные (с нанесением на рабочую часть синтетических алмазов — карбонадо), машинные, вращающиеся и т.д.

При работе напильником рабочий должен стоять устойчиво, под углом 45° к оси тисков. При опиливании напильник перемещают строго горизонтально. Напильник должен касаться обрабатываемой плоскости всей своей поверхностью. Нажимают на напильник только при его движении вперед. По длине рабочего хода усилие нажима должно плавно увеличиваться к середине рабочего хода и

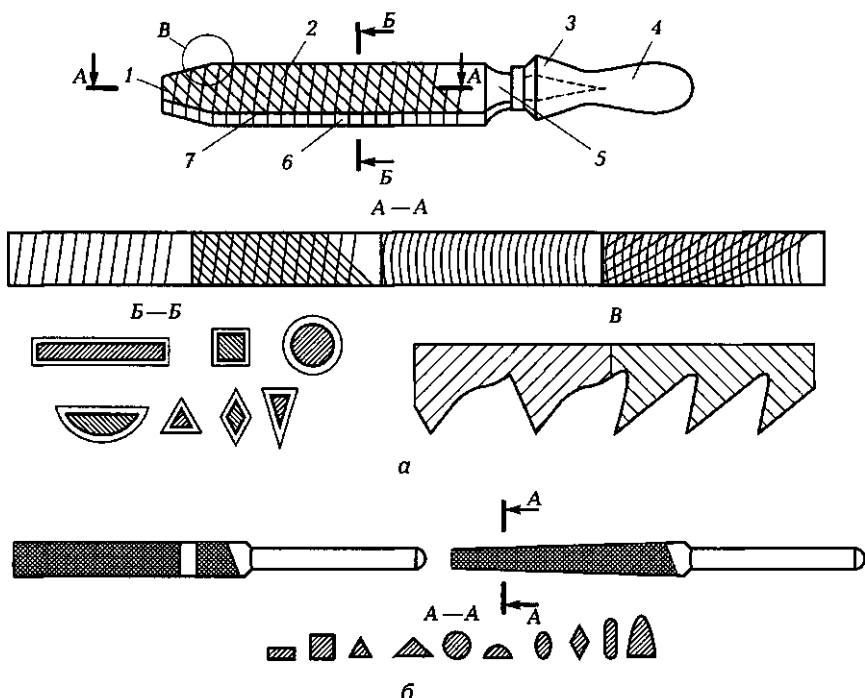


Рис. 5.5. Инструмент для опилования металла:

a — напильники: 1 — нос; 2 — рабочая часть; 3 — хвостовик; 4 — рукоятка; 5 — пятка; 6 — грань; 7 — ребро; *б* — надфили

плавно уменьшаться к его концу. При обработке широких поверхностей напильник перемещают под углом к губкам тисков. Правильность обработки определяют по следам обработки: если следы от предыдущего съема металла исчезли — обработка проведена правильно. Качество обработки проверяют лекальными линейками (на просвет), штангенциркулем (размеры), слесарными угольниками, угомерами, по шаблонам (на просвет или «на краску»).

5.2.5. Гибка металла

Гибка применяется для придания заготовке изогнутой формы по заданному контуру. В процессе гибки металл одновременно подвергается растягивающим и сжимающим напряжениям, поэтому необходимо учитывать упругость, степень деформирования об-

рабатываемого металла, толщину, размеры и радиус изгиба заготовки. Недопустимо выполнять радиус изгиба меньше толщины заготовки, так как это приведет к появлению трещин и других дефектов. Рекомендуется изгибать в холодном состоянии заготовки из листовой стали толщиной до 5 мм, полосовой стали — до 7 мм, круглой стали — диаметром до 10 мм.

При гибке полосы из листовой стали на нее наносят риску загиба. Заготовку зажимают в губках тисков так, чтобы риска была обращена к неподвижной губке и выступала над ней на 0,5 мм. Ударами молотка по направлению к неподвижной губке изгибают заготовку. При гибке скобы заготовку зажимают между угольником и бруском-оправкой. Вначале загибают один конец скобы. Затем устанавливают внутрь брусок-оправку и изгибают второй конец. Гибку полосы под углом, отличным от 90° , осуществляют на оправке с соответствующим углом скоса.

Гибке часто подвергаются трубчатые заготовки. В холодном состоянии вручную гнут медные и латунные трубы диаметром до 8 мм при больших радиусах закругления (10—12 наружных диаметров трубы). Трубы диаметром 20 мм и больше гнут на специальных гибочных станках или с помощью специальных приспособлений. Эти трубы предварительно заполняют просеянным песком или расплавленной канифолью. Медные трубы предварительно отжигают. Стальные трубы диаметром до 10 мм гнут без наполнителя и нагрева. Трубы из алюминиевых сплавов гнут только в нагретом состоянии.

5.2.6. Шабрение

Шабрение — отделочная операция, применяемая для выравнивания и пригонки плоских и криволинейных поверхностей. Поверхность, обработанная шабрением, по сравнению со шлифованной, более износостойка, поскольку не имеет внедренных в нее абразивных зерен.

При шабрении металл срезается с участков, соприкасающихся при пробе на краску с поверхностью, к которой пригоняется заготовка. Шабровочную краску (сажа или лазурь, смешанная с машинным маслом) наносят ровным тонким слоем на поверхность, к которой необходимо пригнать заготовку (для плоских поверхностей применяют специальные шабровочные плиты), тампоном. Заготовку плавно опускают на плиту и медленно передвигают по ней круговыми движениями. Затем заготовку осторожно снима-

ют. На поверхности заготовки можно увидеть следующую картину: наибольшие углубления остались без краски (белые пятна); небольшие углубления заполнились краской (темные пятна); наиболее выступающие участки покрылись тонким слоем краски (серые пятна). Срезают металл с серых участков. Заготовку протирают насухо и проверяют на краску. Постепенно серые участки становятся все мельче и мельче (разбиваются), пока не получится сетка. Шабрение прекращают, когда обработанная поверхность покроется равномерно чередующимися серыми пятнами краски.

Шабрение производят специальным инструментом — шабером. Его держат правой рукой, а ладонью левой руки охватывают инструмент посередине. Рабочим ходом является движение от себя (вперед). При обратном ходе шабер приподнимают. В начале шабрения длина хода инструмента составляет 15...25 мм, по мере выравнивания обработанной поверхности длину хода уменьшают до 2...5 мм. Направление рабочего хода каждый раз изменяют так, чтобы полученные штрихи пересекались под углом 45...60°. Шабрение плоской поверхности начинают с наиболее удаленного края, постепенно приближаясь к ближнему. Окончательное шабрение заключается в расшабривании серых круглых пятен пополам или на несколько равных по размеру и форме частей. Чем точнее шабрение, тем более тонкий слой краски накладывают на плиту. При этом используется узкий шабер (шириной 8...10 мм).

Шабер затачивают под углом заострения β и устанавливают под углом α к обрабатываемой поверхности (рис. 5.6). При обработке стали: для чернового шабрения $\beta = 75...90^\circ$, $\alpha = 15...25^\circ$; для получистового шабрения $\beta = 90^\circ$, $\alpha = 30^\circ$; для чистового шабрения $\beta = 100^\circ$, $\alpha = 30^\circ$. При обработке бронзы $\beta = 90...100^\circ$, $\alpha = 15...25^\circ$. При обработке мягких сплавов $\beta = 35...40^\circ$, $\alpha = 30^\circ$.

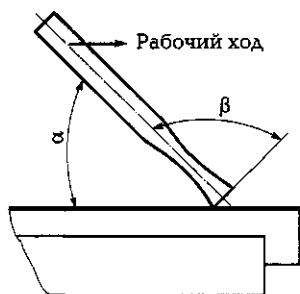


Рис. 5.6. Установка шабера:
 α , β — углы установки шабера

5.2.7. Нарезание резьбы метчиками и плашками

При слесарно-сборочных работах резьба нарезается на станках или вручную специальными инструментами: наружная — резьбовыми резцами или плашками, внутренняя — метчиками.

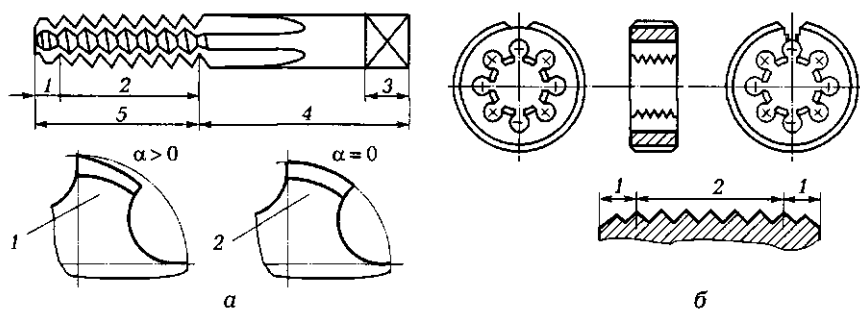


Рис. 5.7. Инструмент для нарезания резьбы:

a — метчик; *б* — плашка; 1 — заборная часть; 2 — калибрующая часть; 3 — квадрат; 4 — хвостовик; 5 — рабочая часть; α — угол резания

При нарезании резьбы важен правильный выбор диаметра заготовки (отверстия или стержня). При малом диаметре отверстия вход метчика в него затруднителен, что может привести к срыву ниток резьбы или поломке метчика. При увеличенном диаметре отверстия резьба не имеет полного профиля, и резьбовое соединение будет ненадежно. Диаметр сверла под резьбу выбирают по специальным таблицам. Приблизительно можно принимать диаметр сверла, равный диаметру резьбы минус шаг. Глухие отверстия необходимо сверлить на несколько большую глубину (увеличение глубины равно 5—6 шагов резьбы).

При нарезании наружной резьбы диаметр стержня заготовки должен соответствовать диаметру резьбы. При малом диаметре стержня профиль резьбы будет неполным, при большом диаметре произойдет срыв ниток резьбы или поломка плашки. Диаметр стержня выбирают по таблицам или приблизительно — на 0,1 мм меньше диаметра резьбы.

Метчик и плашка, в сущности, представляют собой протяжку, т.е. фасонный профильный инструмент. Зубья обоих инструментов соответствуют профилю нарезаемой резьбы и расположены на винтовой спирали. Шаг спирали равен шагу нарезаемой резьбы.

Метчик (рис. 5.7, *a*) состоит из рабочей части 5, хвостовика 4 с квадратом 3 для закрепления инструмента в воротке. Рабочая часть состоит из заборной 1 и калибрующей 2 частей. Режущие зубья рабочей части заточены с задним углом, отличным от нуля. Задний угол калибрующих зубьев равен нулю. По назначению метчики делятся на ручные, машинные и гаечные. Ручные метчи-

ки выпускаются в комплекте из двух или трех штук. Комплект из двух метчиков применяется для нарезания резьб с шагом до 3 мм. При большем шаге применяется комплект из трех метчиков. Полный профиль имеет только чистовой (последний метчик). Приступая к нарезанию резьбы, заготовку закрепляют в тисках и смазывают обрабатываемую поверхность маслом. Вначале метчик устанавливают строго по оси отверстия и с небольшим усилием ввертывают в него. После одного-двух оборотов метчик поворачивают в обратную сторону на 0,5—0,8 оборота. Если метчик заклинило, недопустимо прилагать больших усилий для его вывертывания (можно сломать метчик). В отверстие необходимо залить керосин или жидкость ВД-40. После этого плавными возвратно-крутовыми движениями вывернуть метчик. Чистовые метчики ввертывают в отверстие без воротка. Когда он правильно войдет в отверстие, поворачивают его воротком. Для того чтобы соединение получилось плотным, в мягких материалах резьбу нарезают только первым метчиком. При нарезании резьбы в глухих отверстиях метчик регулярно выворачивают и очищают отверстие от стружки.

Плашка (рис. 5.7, б) состоит из двух заборных 1 и калибрующей 2 частей. В зависимости от конструкции различают плашки круглые цельные, круглые разрезные и раздвижные. Разрезные плашки снабжены сквозной прорезью, позволяющей регулировать диаметр резьбы в пределах 0,1...0,15 мм. Плашку крепят в специальном воротке (плашкодержателе). Раздвижные плашки крепят в клуппе. Работа с плашкой не отличается от работы с метчиком. Плашку необходимо устанавливать строго соосно обрабатываемой поверхности (оси стержня), не прилагать чрезмерных усилий при резании, давать обратный ход плашке для выламывания и удаления стружки, при резании пользоваться смазочно-охлаждающими технологическими жидкостями (СОТЖ).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое технологическая база?
2. Для чего предназначается правка?
3. Почему при правке материала нельзя воздействовать непосредственно на выпуклости?
4. Какой инструмент используют для разметки?
5. Зачем производят кернение разметочных рисков?
6. Какой инструмент используют для вырубания пазов и смазочных канавок?

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

Обработка металлов резанием — это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки в целях получения заданной геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхности детали.

6.1. РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ

6.1.1. Общие сведения

Для обработки детали режущий инструмент и заготовку необходимо установить и закрепить в рабочих органах станка и сообщить им относительные движения. Движения, обеспечивающие срезание с заготовки поверхностного слоя металла или изменение состояния обработанной поверхности, называют движениями резания. К ним относят главное движение и движение подачи.

Главное движение D_r — движение, определяющее скорость деформирования и отделения стружки.

Движение подачи D_s — движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущей кромки инструмента в заготовку. Эти движения могут быть вращательными, поступательными, возвратно-поступательными, непрерывными или прерывистыми.

Для любого процесса резания можно составить схему обработки (рис. 6.1), на которой условно изображают обрабатываемую заготовку 2, ее базирование 8 и закрепление 7 в рабочем приспособлении станка 3, режущий инструмент 1 в положении, соответствующем концу обработки. Обработанную поверхность 6 выделяют красной или утолщенной черной линией. Используя условные обозначения, показывают характер движений резания (главное движение D_r и движение подачи D_s), их технологическое назначение.

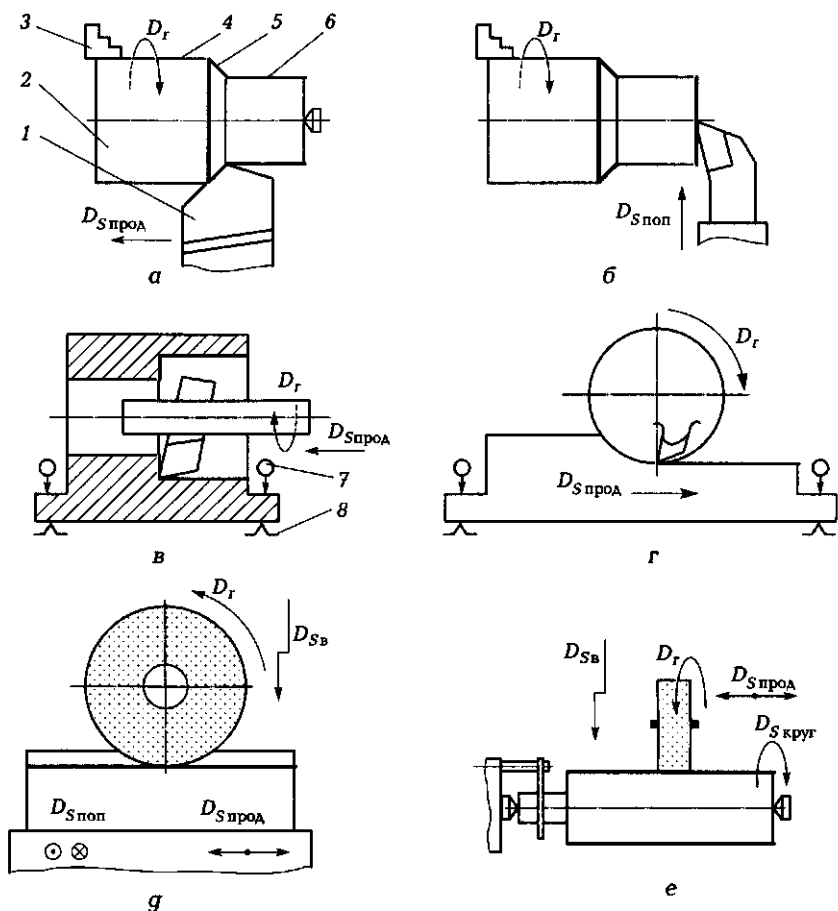


Рис. 6.1. Схемы обработки заготовок:

a — продольным точением; *б* — поперечным точением; *в* — растачиванием; *г* — фрезерованием; *г* — плоским шлифованием; *е* — круглым шлифованием; 1 — режущий инструмент; 2 — заготовка; 3 — станочное (рабочее) приспособление; 4 — обрабатываемая поверхность; 5 — поверхность резания; 6 — обработанная поверхность; 7 — прижим; 8 — базировочный элемент; D_r — движение резания; $D_{S\text{прод}}$, $D_{S\text{поп}}$, $D_{S\text{круг}}$ — соответственно продольное, поперечное и круговое движения подачи

Различают движения подачи продольное $D_{S\text{прод}}$ (рис. 6.1, *a*), поперечное $D_{S\text{поп}}$ (рис. 6.1, *б*), вертикальное $D_{S\text{в}}$ (рис. 6.1, *г*), круговое $D_{S\text{круг}}$ (рис. 6.1, *е*) и др. В процессе резания на заготовке различают (см. рис. 6.1, *a*) обрабатываемую поверхность 4, с которой снимают стружку; обработанную поверхность 6, полученную в процессе обработки; поверхность резания 5, образуемую в результате воздействия главной режущей кромки инструмента.

6.1.2. Элементы процесса резания и геометрия срезаемого слоя

Элементами процесса резания являются скорости движений резания и глубина резания. Совокупность этих элементов называется режимом резания.

Скорость резания v — путь точки режущего лезвия инструмента в направлении главного движения относительно заготовки в единицу времени. Размерность скорости резания: для лезвийной обработки — м/мин, для абразивной обработки — м/с.

Если главное движение является вращательным, то

$$v = \pi D_3 n / 1\,000, \text{ м/мин,}$$

или

$$v = \pi D_3 n / (1\,000 \cdot 60), \text{ м/с,}$$

где D_3 — наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки (диаметр вращающегося инструмента), мм; n — частота вращения заготовки (вращающегося инструмента), об/мин.

Если главное движение является возвратно-поступательным, а скорости рабочего и холостых ходов разные, то средняя скорость равна

$$v_{cp} = Lm(k + 1) / 1\,000, \text{ м/мин,}$$

где L — расчетная длина хода резца, мм; m — число двойных ходов резца в минуту; $k = v_{p.x} / v_{x.x}$ — коэффициент отношения скорости рабочего хода $v_{p.x}$ к скорости холостого хода $v_{x.x}$.

Скорость движения подачи (подачи) S — путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в единицу времени в направлении движения подачи. Различают подачу в минуту (минутная подача), подачу на оборот, подачу на зуб и подачу на двойной ход. Подача в минуту S_m — перемещение режущего инструмента в минуту, мм/мин; подача на оборот S_o — перемещение режущего инструмента за один оборот заготовки или инструмента, мм/об; для многозубых инструментов подача на зуб S_z — перемещение режущего инструмента за время поворота на угол, равный угловому шагу зубьев, мм/зуб; подача на двойной ход S_{2x} — перемещение режущего инструмента за один двойной ход, мм/2х.

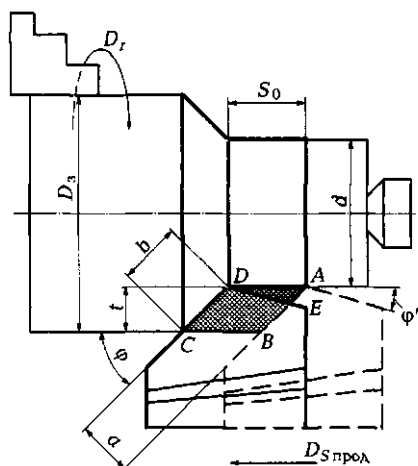


Рис. 6.2. Элементы процесса резания и геометрия срезаемого слоя:

D_3 — диаметр заготовки; d — диаметр обработанной поверхности; D_t — движение резания; $D_{S\text{ прод}}$ — движение продольной подачи; S_0 — подача на оборот; t — глубина резания; ϕ , ϕ' — главный и вспомогательный углы в плане; a , b — толщина и ширина срезаемого слоя

$$S_M = S_0 n = S_z n z = S_{2x} m,$$

где z — число зубьев инструмента.

Глубина резания t — кратчайшее расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями, мм.

При точении (рис. 6.2) глубина резания равна $t = 0,5(D_3 - d)$, где d — диаметр обработанной поверхности.

Форма и размеры срезаемого слоя зависят от глубины резания, подачи на оборот, геометрии режущего инструмента (углов ϕ и ϕ') и формы режущей кромки инструмента. При перемещении инструмента вдоль оси заготовки его вершина описывает винтовую линию с шагом, равным S_0 . Следовательно, не вся площадь поперечного сечения материала A_{ABCD} будет срезана с заготовки. Действительное сечение срезаемого слоя: $A_{BCDE} = A_{ABCD} - A_{AED}$. Остаточное сечение A_{AED} в виде винтовой линии останется на заготовке. Однако фактическая шероховатость обработанной поверхности определяется не только остаточным сечением A_{AED} , но и физико-механическими свойствами материала заготовки, вибрациями технологической системы станок — приспособление — инструмент — деталь и т.д.

6.1.3. Элементы и части токарного прямого проходного резца

Токарный прямой проходной резец (рис. 6.3) состоит из рабочей части (головки) 2 и тела (стержня) 3. Тело резца служит для его установки и закрепления в резцедержателе. Рабочая часть резца образуется при его заточке и содержит следующие элементы: переднюю поверхность 4 (поверхность, по которой сходит стружка); главную заднюю поверхность 7 (она наиболее развита и направлена по движению подачи); вспомогательную заднюю поверхность 1 (направлена против движения подачи). Пересечение передней и главной задней поверхностей дает главную режущую кромку 6, пересечение передней и вспомогательной задней поверхностей дает вспомогательную режущую кромку 5. Режущие кромки пересекаются в вершине резца 8.

Расположение поверхностей и кромок резца определяется его заточкой (геометрия инструмента). Для определения углов, под которыми располагаются элементы инструмента (ГОСТ 25762—83), вводят координатные плоскости. Рассматривают три системы

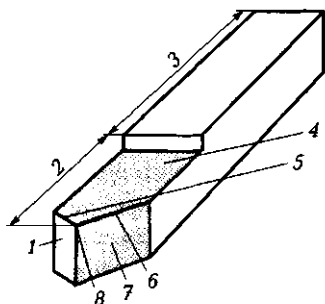


Рис. 6.3. Элементы и части прямого токарного проходного резца:

1 — вспомогательная задняя поверхность; 2 — головка резца; 3 — тело резца; 4 — передняя поверхность; 5 и 6 — вспомогательная и главная режущие кромки; 7 — главная задняя поверхность; 8 — вершина резца

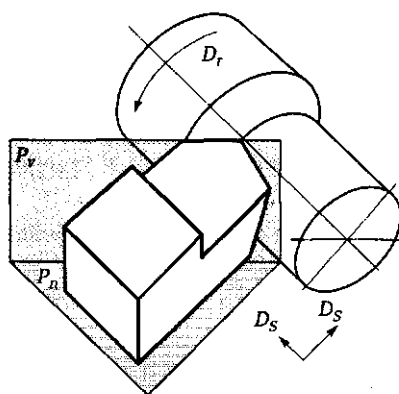


Рис. 6.4. Координатные плоскости токарного проходного резца:

P_v — основная плоскость; P_n — плоскость резания; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

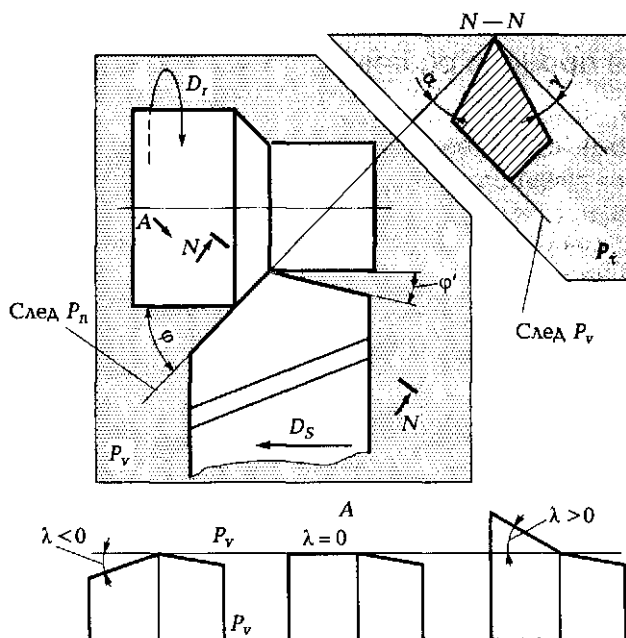


Рис. 6.5. Углы реза в статической системе координат:

P_v — основная плоскость; P_n — плоскость резания; P_t — главная секущая плоскость; α, γ — главные задний и передний углы; ϕ, ϕ' — главный и вспомогательный углы в плане; λ — угол наклона главной режущей кромки; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

координат: инструментальную, статическую и динамическую. В инструментальной системе координат инструмент рассматривается как геометрическое тело. В статической системе координат скорость главного движения отлична от нуля, а скорость движения подачи равна нулю. В динамической системе координат скорости главного движения и движения подачи отличны от нуля.

На рис. 6.4 показаны координатные плоскости токарного проходного резца в статической системе координат. Основная плоскость P_v параллельна всем возможным направлениям движения подачи для данного способа обработки. Плоскость резания P_n проходит через главную режущую кромку касательно поверхности резания. Главная секущая плоскость P_t проходит через главную режущую кромку перпендикулярно поверхности резания (рис. 6.5).

6.1.4. Геометрия инструмента и ее влияние на процесс резания и качество обработки

Рассмотрим геометрию режущей части инструмента в статической системе координат на примере токарного проходного резца (см. рис. 6.5).

Главные углы рассматриваются в главной секущей плоскости P_r .

Главный задний угол α — угол между касательной к главной задней поверхности в рассматриваемой точке главной режущей кромки и плоскостью резания. Наличие угла уменьшает трение между обработанной и главной задней поверхностями, что увеличивает стойкость инструмента. Однако чрезмерное увеличение угла приводит к уменьшению прочности режущего лезвия. Величина угла находится в пределах $5 \dots 10^\circ$ и выбирается в зависимости от упругих свойств обрабатываемого материала. Для видов обработки, при которых скорость подачи соизмерима со скоростью главного движения (например, нарезание резьбы), угол выбирается в пределах $8 \dots 15^\circ$.

Главный передний угол γ — угол между основной плоскостью и передней поверхностью. Он может быть положительным (если передняя поверхность расположена ниже основной плоскости), равным нулю (передняя поверхность совпадает с основной плоскостью) и отрицательным (если передняя поверхность расположена выше основной плоскости). Угол оказывает большое влияние на процесс резания. С увеличением угла уменьшаются деформации срезаемого слоя (режущему клину легче врезаться в металл), улучшаются условия схода стружки, уменьшаются силы резания, повышается качество обработки. Однако чрезмерное увеличение угла приводит к уменьшению прочности режущего лезвия, увеличению износа режущего лезвия вследствие выкрашивания, ухудшению теплоотвода от инструмента.

При обработке низкоуглеродистых и низколегированных сталей быстрорежущим инструментом угол γ выбирают в пределах $12 \dots 18^\circ$. При обработке вязких материалов угол увеличивается, а при обработке хрупких и твердых материалов уменьшается вплоть до отрицательных значений.

Углы в плане рассматриваются между направлением движения подачи и проекцией соответствующей режущей кромки на основную плоскость.

Главный угол в плане ϕ — угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением движения

подачи. Он определяет параметры переходного конуса между обрабатываемыми цилиндрами и угол фасок, т.е. определяется конструктором. В основном угол ϕ влияет на шероховатость обработанной поверхности. С уменьшением угла шероховатость уменьшается, одновременно уменьшается толщина и увеличивается ширина срезаемого слоя, следовательно, уменьшаются сила и температура резания, приходящиеся на единицу длины режущей кромки, но резко увеличивается сила резания в направлении, перпендикулярном оси заготовки. Значения угла ϕ — в пределах $30 \dots 90^\circ$.

Вспомогательный угол в плане ϕ' — угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением движения подачи. С уменьшением угла снижается шероховатость обработанной поверхности, одновременно увеличиваются прочность режущего лезвия и его стойкость. Значения угла ϕ' находятся в пределах $15 \dots 30^\circ$.

Угол наклона главной режущей кромки. Главная режущая кромка не всегда совпадает с основной плоскостью, поэтому вводится угол наклона главной режущей кромки λ — угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью, проведенной через вершину резца. Если вершина резца является высшей частью главной режущей кромки, $\lambda > 0$; если совпадает с основной плоскостью, $\lambda = 0$; если вершина является низшей частью главной режущей кромки, $\lambda < 0$. Мнемоническое правило: *если резец «заграл нос» (вершина — высшая точка режущей кромки), резец «азналос» — качество отрицательное и угол отрицателен.*

С увеличением угла ухудшается качество обработанной поверхности. Но чаще всего выбор величины и знака угла определяется направлением схода стружки. При отрицательных углах стружка сходит по направлению движения подачи, что безопасно при работе на универсальных станках. При положительных углах стружка сходит по направлению против движения подачи, что безопасно при работе на станках с автоматическим и полуавтоматическим циклом. Положительные углы применяются при обработке отверстий, для того чтобы стружка выходила из отверстия.

6.1.5. Инструментальные материалы

В зоне резания на инструмент воздействуют высокотемпературное поле ($300 \dots 800^\circ\text{C}$ и выше), высокое давление (более 500 МПа) и высокое истирающее воздействие стружки. Режущий инструмент находится в достаточно агрессивной физико-

химической среде (особенно при применении СОТС — смазочно-охлаждающих технологических сред). Поэтому инструментальные материалы должны обладать особыми физико-механическими и технологическими свойствами. К основным из них относятся: высокая твердость, прочность, пластичность, температуростойкость (табл. 6.1); высокое сопротивление схватываемости с обрабатываемой поверхностью и износостойкость; низкая склонность к трещинообразованию; хорошая свариваемость или способность к соединению пайкой; низкая стоимость и высокая технологичность. Обработке подвергаются самые различные материалы, ниже приводятся скорости резания для стандартных условий резания, а именно: наружное точение стали 45, глубина резания 1 мм, подача 0,1 мм/об, стойкость 100 мин.

Углеродистые стали относятся к инструментальным материалам общего назначения, применяемым для изготовления ручного режущего инструмента (скорость резания до 5 м/мин). Основные марки: У9, У10, У10А, У11А, У12А.

Низколегированные стали, как и углеродистые, применяются для ручного режущего инструмента, но могут применяться и для инструмента, работающего со скоростями до 15 м/мин. В основном используются стали, легированные хромом, ванадием, кремнием и марганцем.

Быстрорежущие стали широко применяются в промышленности для изготовления инструментов, работающих со скоростями резания 20...50 м/мин. Различают стали обычной производительности, работающие со скоростью резания до 20 м/мин (марки Р9, Р12, Р18, Р6М5, Р9К10 и др.), стали повышенной производительности, работающие со скоростью резания до 50 м/мин (марки

Таблица 6.1. Физико-механические свойства основных групп инструментальных материалов

Инструментальный материал	$\sigma_{\text{н}}$, МПа	Твердость		Температуростойкость, °С
		HRA (HRC)	HV	
Быстрорежущие стали	2 050...4 500	79...88 (64...68)	750...1 500	620...650
Твердые сплавы	950...1 600	88...92	1 500...1 900	800...1 000
Минерало-керамика	500...750	93...94	2 000...2 500	1 000...1 200
Сверхтвердые материалы	300...1 000	—	5 000...100 000	750...1 300

Р6М5К5, 10Р6М5Ф3, Р10К5Ф5 и др.), и порошковые стали, работающие со скоростью резания до 70 м/мин (марки Р6М5К5М, Р6М5К5ОМ, 10Р6М5К5Ф3ОМ).

Расшифровка химического состава сталей: цифра перед буквой Р показывает содержание углерода в десятых долях процента; цифра после буквы Р показывает процентное содержание вольфрама; обозначение легирования стали аналогично обозначению конструкционных сталей. Для порошковых сталей окончание М обозначает мелкую структуру; окончание ОМ — особо мелкую структуру.

Рекомендации по применению некоторых быстрорежущих сталей приведены в табл. 6.2.

С 1980 г. в промышленности применяются быстрорежущие стали повышенной температуростойкости (до 725 °С) с интерметаллидным упрочнением марок В11М7К23, В4М12К23 и др. Эти стали применяются в основном для точения, фрезерования и строгания труднообрабатываемых материалов. По сравнению со сталью Р18 их стойкость выше: при обработке титановых сплавов — в 20—45 раз, при обработке аустенитных и коррозионно-стойких сталей — в 8—15 раз, при обработке чугунов — в 3—4 раза.

Твердые сплавы. Металлокерамические твердые сплавы состоят из тонко измельченных карбидов тугоплавких металлов (воль-

Таблица 6.2. Рекомендации по применению быстрорежущих сталей

Марка стали	Назначение
Р18	Сложнопрофильный режущий инструмент
Р6М5	Все виды режущего инструмента, работающего в условиях ударных нагрузок. Обработка чугунов и конструкционных сталей
Р6М5К5	Осевой режущий инструмент при работе на повышенных режимах. Обработка чугунов, конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей
Р9К5 Р9К10	Фрезы для черновой обработки, долбяки, метчики. Обработка чугунов, обычных и труднообрабатываемых сталей
Р12Ф3 Р6М5Ф3	Получистовая и чистовая обработка. Фасонный инструмент. Обработка обычных и вязких сталей
Р18К5Ф3 Р10К5Ф5	Черновая и получистовая обработка. Резцы, осевой инструмент. Обработка труднообрабатываемых материалов

фрам, титан, тантал), соединенных цементирующим металлом — кобальтом. Благодаря наличию карбидов тугоплавких металлов сплавы имеют высокую температуростойкость, твердость и износостойкость, поэтому допускается скорость резания 100...150 м/мин.

Существует четыре вида твердых сплавов: вольфрамовые, вольфрамтитановые, вольфрамтитанотанталовые и безвольфрамовые.

В группу *вольфрамовых* твердых сплавов входят ВКЗ, ВКЗМ, ВК4, ВК6ОМ, ВК6М, ВК8, ВК10ОМ, ВК10М, ВК15 (В — карбид вольфрама, К — кобальт, число после К — процентное содержание кобальта, остальное — карбиды вольфрама, М — мелкозернистый, ОМ — особо мелкозернистый). По сравнению с другими вольфрамсодержащими твердыми сплавами они характеризуются наибольшими пределом прочности на изгиб и вязкостью, но наименьшими температуростойкостью и твердостью. При этом с увеличением содержания кобальта увеличивается предел прочности на изгиб, но уменьшается твердость. С уменьшением размера зерен карбидов повышаются режущие свойства сплавов, что особенно заметно при резании труднообрабатываемых материалов. Поэтому вольфрамовые твердые сплавы рекомендуются для обработки чугуна, цветных сплавов и труднообрабатываемых материалов с небольшими скоростями резания.

В группу *вольфрамтитановых* твердых сплавов входят Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12 (Т — карбид титана, число после Т — процентное содержание карбида титана, К — кобальт, число после К — процентное содержание кобальта, остальное — карбиды вольфрама). Эти сплавы характеризуются наибольшими твердостью, температуростойкостью и износостойкостью, но менее прочны, чем сплавы группы ВК. Поэтому они рекомендуются для обработки сталей (сплавы с большим содержанием титана рекомендуются для чистовой и получистовой обработки с большими скоростями, а сплавы с меньшим содержанием титана — для получистовой и черновой обработки и для фрезерования).

В группу *вольфрамтитанотанталовых* твердых сплавов входят ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ30К4, ТТ20К9 (ТТ — карбиды титана и тантала, число после ТТ — суммарное процентное содержание карбидов титана и тантала, К — кобальт, число после К — процентное содержание кобальта, остальное — карбиды вольфрама). Эти сплавы по своим показателям занимают промежуточное место между сплавами групп ВК и ТК, поэтому они очень эффективны при черновой обработке сталей и чугунов, при строгании и фрезеровании.

В группу безвольфрамовых твердых сплавов входят КНТ-16 и ТН-20 (Т — карбид титана, Н — никель, КН — карбонитрид титана, число — суммарное процентное содержание никеля и молибдена, остальное — карбид титана или карбонитрид титана). Эти сплавы рекомендуются для получистового и чистового точения и фрезерования чугуна, углеродистых сталей и цветных сплавов.

Минералокерамика — инструментальный материал на основе оксида алюминия Al_2O_3 , обладающий большими, чем у твердых сплавов, твердостью и температуростойкостью, но меньшей ударной вязкостью. Поэтому их используют только для чистовой обработки и расточки деталей из высокопрочных чугунов, закаленных сталей и для резания неметаллических материалов со скоростями до 200 м/мин. Различают оксидную (белую), оксидно-карбидную, оксидно-нитридную керамику и керметы.

Оксидная керамика полностью состоит из оксида алюминия (марки ВО13, ВШ-75). Ее рекомендуют для чистового и получистового точения нетермообработанных сталей, серых и ковких чугунов твердостью менее 500 НВ. **Оксидно-карбидная керамика**, кроме оксида алюминия, имеет в своем составе легирующие добавки карбидов хрома, титана, вольфрама и молибдена (марки ВЗ, ВОК60, ВОК63). Ее рекомендуют для чистового и получистового точения и фрезерования закаленных сталей, отбеленных и серых чугунов, коррозионно-стойких сталей. **Оксидно-нитридная керамика** состоит из нитридов кремния и тугоплавких материалов, включая и оксид алюминия (марки силинит-Р, ОНТ-20). Эта керамика позволяет заменить вольфрамсодержащие твердые сплавы при получистовом и чистовом точении различных материалов. При точении закаленных сталей качество обработки соизмеримо со шлифованием. **Керметы** состоят из оксида алюминия, химически связанного металлами (железо, никель, титан, цирконий, хром или молибден). Марки: ВЗ, В4. Керметы рекомендуются для получистового и чистового точения хромоникельмолибденовых сталей твердостью 50 ... 55 HRC со скоростью резания 110 ... 200 м/мин.

Сверхтвердые материалы. При резании металлов применяют синтетические алмазы и материалы на основе кубического нитрида бора (композиты).

Алмаз обладает наибольшей из всех известных материалов твердостью (до 100 000 НВ), малыми коэффициентами линейного расширения и трения. Но весьма малы прочность на изгиб и ударная вязкость. При температуре 750 °С алмаз растворяется в железе, что препятствует его применению при обработке сплавов, содержащих Fe. Разновидности алмаза: баллас (АБС) применяется

для обработки деталей из стеклопластика со скоростями резания до 450 м/мин, *карбонаго* (АСПК) — для обработки алюминиевых и медных сплавов.

Композит — синтетический материал, по твердости не уступающий алмазу, превосходящий его по температуростойкости и инертный к железу. Выпускаются следующие марки: композит 01 (эльбор-Р), композит 02 (белбор), композит 05 и 5-И (исмит), композит 09 (ПТНБ-ИК), композит 10 (гексагонит-р).

Композиты 01 и 02 имеют твердость 7 500 HV, предел прочности на изгиб $\sigma_{\text{и}} = 500 \dots 750$ МПа; основная область применения — чистовое и тонкое, так называемое алмазное, точение. Обрабатывают закаленные стали (50...60 HRC — скорость резания 50...160 м/мин, 60...70 HRC — скорость резания 60...120 м/мин), серые и высокопрочные чугуны — со скоростью 500...1 200 м/мин, отбеленные чугуны — со скоростью 100...200 м/мин, твердые сплавы (группы ВК) — со скоростью 8...12 м/мин. *Композиты 09 и 10* имеют твердость 5 000...7 500 HV, предел прочности на изгиб $\sigma_{\text{и}} = 700 \dots 1\,000$ МПа; рекомендованы для чистового и тонкого фрезерования. Обрабатываемые материалы и скорости резания аналогичны композитам 01 и 02. *Композит 05* спекается из порошков кубического нитрида бора и оксида алюминия, по своим свойствам является удачным компромиссом между композитами 01 и 10. Рекомендации аналогичны композиту 10, но возможны подачи до 0,3 мм/об, глубина резания 0,2...2 мм.

Стойкость инструмента, оснащенного композитами, находится в пределах 45...75 мин. Она может быть повышена на 30 % при охлаждении инструмента сжатым воздухом (давление 150 ГПа) и на 50 % при охлаждении 2,5%-ным раствором СОТЖ.

6.1.6. Классификация современных твердых сплавов по международному стандарту ИСО 513 и определение условий их эффективного использования

В настоящее время большинство машиностроительных предприятий России используют рекомендации международной организации стандартов ИСО (ISO). В соответствии с ISO 513—75 рекомендации к применению керамических твердых сплавов должны учитывать:

- вид обрабатываемого материала;

- тип стружки, тип обработки (чистовая, получистовая, легкая черновая и черновая), условия обработки (хорошие, нормальные и тяжелые);
- виды обработки (точение, растачивание, фрезерование и др.).

По ISO 513—75 обрабатываемые материалы разделены на три группы: Р (обозначаются синим цветом), М (желтым) и К (красным).

Группа Р — стали и стальное литье, при обработке которых получают сливную стружку (например, стали 08кп, 10, А12, Ст3, Ст45, А40Г, 60, У7А, 20Х, 12ХН13А, 38Х2Н2МА, ШХ15ГС, 7ХФ, 9ХС, ХВГ, Р6М5, 20Л, У8Л, 35ХГСА и 5Х14НДЛ).

Группа М — коррозионно-стойкие стали, титановые и жаропрочные сплавы, при обработке которых получают стружку надлома и сливную стружку (например, стали и сплавы: 12Х13, 12Х18Н10Т, ХН32Т, 11Х11Н2В2МФ, ХН67ВТМЮЛ, ВТ1-00, ВТ5 и ВТ14).

Группа К — чугуны, цветные металлы и их сплавы, материалы с высокой поверхностной твердостью, при обработке которых получают стружку надлома и элементную стружку (например: чугуны — Ч10, СЧ45, ВЧ35, ВЧ100, КЧ37-12 и КЧ50-5; сплавы — АМГ2, Д16, АЛ3, АС63-1, А96 и АО70-1; закаленные стали).

Каждая группа применения подразделяется на подгруппы, причем с увеличением индекса подгруппы от 01 до 50, условия обработки становятся более жесткими, начиная от чистового резания и заканчивая черновым с ударами. Чем больше индекс подгруппы

Таблица 6.3. Подгруппы применения твердых сплавов группы резания Р

Обозначение	Обрабатываемый материал	Вид и условия обработки
P01	Сталь	Чистовое точение, растачивание, развертывание
P10		Точение, нарезание резьбы, фрезерование, растачивание и рассверливание
P20	Сталь, ковкий чугун	Точение, фрезерование, строгание
P25	Сталь низко- и среднелегированная	Фрезерование, в том числе пазов, виды обработки при которых от сплава требуется высокое сопротивление тепловым нагрузкам

Обозначение	Обрабатываемый материал	Вид и условия обработки
P30	Сталь, ковкий чугун	Черновое точение, фрезерование, строгание в неблагоприятных условиях*
P40	Сталь с включениями песка и раковинами	Черновое точение, фрезерование, строгание в особо неблагоприятных условиях*
P50	Сталь со средней и низкой прочностью, включениями песка	Точение, строгание при особо высоких требованиях к сплаву в связи с неблагоприятными условиями*. Для сложнофасонного инструмента

* Работа с переменной глубиной резания, прерывистой подачей, ударами, вибрациями, наличием литейной корки и абразивных включений в обрабатываемом материале.

применения, тем ниже требуется износостойкость твердого сплава и допустимая скорость резания, но необходимы выше прочность (ударная вязкость) и допустимая скорость движения подачи и глубина резания. Пример для группы *P* приведен в табл. 6.3.

Из анализа данных в табл. 6.3 следует, что малые индексы соответствуют чистовым операциям, когда от твердых сплавов требуется высокая износостойкость и теплостойкость, а большие индексы соответствуют черновым операциям, т.е. когда твердый сплав

Таблица 6.4. Рекомендации по применению твердых сплавов

Условия обработки*	Группа по ISO 513—75	Тип обработки**			
		Чистовая	Получистовая	Черновая	Обдирочная
Хорошие	P	P01-10	P10-25	P25-30	P30-35
	M	M10-15	M15-20	M20-25	M25-30
	K	K01-05	K05-10	K10-15	K15-20
Нормальные	P	P10-25	P25-30	P30-40	P40-50
	M	M15-20	M20-25	M25-30	M30-35
	K	K05-10	K10-15	K15-20	K20-25

Условия обработки*	Группа по ISO 513—75	Тип обработки**			
		Чистовая	Получистовая	Черновая	Обдирочная
Тяжелые	P	P30-35	P35-40	P40-45	P40-50
	M	M20-25	M25-30	M30-35	M35-40
	K	K10-15	K15-20	K20-25	K25-30

* Условия обработки: хорошие — высокие скорости, непрерывное резание, предварительно обработанные заготовки, высокая жесткость упругой технологической системы; нормальные — умеренные скорости резания, обработка поковок и отливок, достаточно жесткая упругая технологическая система; тяжелые — невысокие скорости, прерывистое резание, толстая корка на литье или поковках, нежесткая упругая технологическая система.

** Тип обработки: чистовая — $t = 0,25 \dots 2$ мм, $S_0 = 0,05 \dots 0,15$ мм/об; получистовая — $t = 0,5 \dots 3$ мм, $S_0 = 0,1 \dots 0,3$ мм/об; черновая — $t = 0,5 \dots 6$ мм, $S_0 = 0,2 \dots 0,5$ мм/об; обдирочная — $t = 5 \dots 10$ мм, $S_0 = 0,4 \dots 1,8$ мм/об.

Таблица 6.5. Стандарты, определяющие области применения твердых сплавов

ГОСТ 3882—74	ISO 513—75	ГОСТ 3882—74	ISO 513—75
T30K4	P01	T15K6, MC111*	P10
T14K8, MC121	P20	TT20K9, MC137	P30
T5K10, MC146	P40	TT7K12	P50
BK6OM, MC131	M05	BK6M, TT8K6, MC211	M10
TT10K8, MC211, MC321	M20	BK10OM, TT7K12	M30
BK15OM, MC241	M40	BK3, MC301	K01
BK6OM, MC306	K05	TT8K6, BK6M	K10
BK4, T8K7	K30	MC318, MC321	K30
BK8	K30	BK15, MC347	K40

* Твердые сплавы серии MC выпускаются на Московском комбинате твердых сплавов (МКТО) по технологии фирмы Sandvik Coromant.

должен обладать высокой прочностью. В связи с этим каждая марка имеет свою предпочтительную область применения, в которой она обеспечивает максимальные работоспособность сплава и производительность обработки (табл. 6.4 и 6.5).

6.1.7. Физические основы процесса резания металлов

Резание металлов — это сложный процесс физико-химического взаимодействия режущего инструмента, заготовки и окружающей среды. Упрощенно процесс резания можно представить в виде схемы, показанной на рис. 6.6.

На режущем лезвии реального резца можно различить округление лезвия BC и площадку износа AB . Поэтому реальной передней поверхностью будет поверхность BCF , а реальной задней поверхностью — GAB . В начальный момент режущее лезвие инструмента вдавливается в металл, в срезаемом слое возникают упругие деформации, которые затем переходят в пластические. В плоскости, перпендикулярной траектории перемещения резца, возникают нормальные напряжения σ , а в плоскости, совпадающей с траекторией перемещения резца, — касательные напряжения τ . В оконечности передней поверхности (точка B) касательные напряжения τ наибольшие и уменьшаются по мере удаления от нее. Нормальные напряжения σ вначале действуют как растягивающие ($+\sigma$), а затем быстро уменьшаются до нуля и переходят в напряжения сжатия ($-\sigma$). Срезаемый слой металла пластически деформируется. Рост пластических деформаций приводит к деформации сдвига, т.е. смещению частей кристалла относительно друг друга. Эти деформации происходят в зоне $BCED$, называемой зоной стружкообразования. В плоскости CE происходит разрушение кристаллов — скалывание отдельных элементарных объемов металла, и образуется сегмент стружки. Далее процесс повторяется.

Условно считают, что деформации сдвига происходят в плоскости OO , называемой плоскостью сдвига. Она располагается под углом приблизительно 30° к направлению движения резца. Срезанный сегмент стружки деформируется вследствие трения о переднюю поверхность и закручивается в спираль. Структура металла в зоне $BCED$ отличается от структуры нижележащих слоев основного металла. (На рис. 6.6 недеформированные слои условно показаны в виде окружностей. По мере деформации окружности сплющиваются, и большая ось получившихся овалов располагается

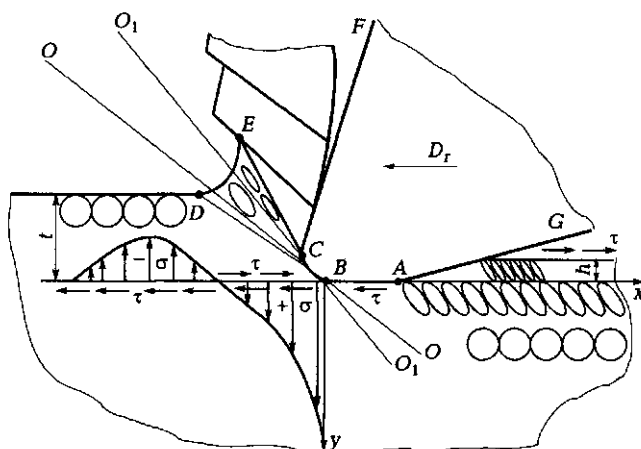


Рис. 6.6. Схема процесса резания:

BCF — передняя поверхность; *GAB* — задняя поверхность; *BD* — плоскость скалывания; *BCED* — зона стружкообразования; *OO* — плоскость сдвига; *O₁O₁* — направление осей деформированных кристаллов; *D_f* — движение резания; *h* — упругое восстановление обработанной поверхности; *t* — глубина резания; σ — нормальные напряжения; τ — касательные напряжения

вдоль линии O_1O_1 .) Характер деформаций срезаемого слоя зависит от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента, условий обработки, режимов резания.

Знание законов явлений, сопровождающих процесс резания, позволяет влиять на качество обработанного слоя и точность обработки. При обработке пластичных металлов превалирует пластическая деформация, и угол между OO и O_1O_1 принимает значения до 30° . При резании с малыми скоростями и большими величинами подачи и глубины резания стружка имеет ярко выраженные плоскости сдвига и сегменты (стружка скалывания). При резании с большими скоростями и малыми величинами подачи и глубины резания стружка имеет вид сплошной ленты, прирезцовая сторона гладкая, на внешней стороне видны небольшие пилообразные зазубрины (сливная стружка). Эта стружка достаточно опасна с точки зрения техники безопасности, ее сложно убирать со станка, сложно транспортировать в отделение переработки стружки, поэтому необходимо применять специальные устройства для ее дробления (стружколомные канавки на передней поверхности резца и т. п.). При обработке хрупких материалов пластическая деформация практически отсутствует, и угол между OO и

O_1O_1 близок к нулю. Стружка имеет вид отдельных, не связанных друг с другом сегментов (стружка надлома).

По мере прохождения режущего инструмента обработанная поверхность, вследствие воздействий упругих и пластических деформаций, упруго восстанавливается на величину h , и структура поверхностных слоев отличается от структуры сердцевины. Твердость поверхностного слоя будет выше твердости сердцевины, образуется так называемый наклепанный слой, или наклеп. Значения величины упругого восстановления обработанной поверхности, твердости поверхностного слоя и глубины расположения наклепанного слоя, эпюры напряжений зависят от физико-механических свойств обрабатываемого металла, геометрии режущего инструмента, условий обработки, режимов резания. Чем больше упруго-пластические свойства обрабатываемого материала, чем больше применяемые глубина резания и подача и чем меньше скорость резания, тем больше величина упругого восстановления обработанной поверхности, твердость поверхностного слоя и тем глубже распространен наклеп.

6.1.8. Сила резания

Под силой резания понимают силу сопротивления перемещению режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки. Работа резания — работа, затрачиваемая на упругое и пластическое деформирование металла, на его разрушение и на трение задней поверхности об обработанную поверхность и стружки о переднюю поверхность режущего инструмента. Результатом сопротивления металла заготовке процессу резания является возникновение реактивных сил, действующих на режущий инструмент (рис. 6.7, а).

Реактивные силы — это силы упругого (P_{y1} и P_{y2}) и пластического ($P_{п1}$ и $P_{п2}$) деформирования, направленные перпендикулярно соответственно задней и передней поверхностям инструмента, и силы трения (T_1 и T_2) по задней и передней поверхностям. Векторная сумма всех этих сил даст единичную силу резания по сечению резца. Просуммировав единичные силы, получим равнодействующую силу резания R . Однако вследствие переменности условий резания (неоднородность структуры металла заготовки, допуски на размеры обрабатываемой поверхности и т. д.) равнодействующая сила резания R переменна по величине и направлению. Поэтому для расчетов используют ее проекции на заданные координатные оси (рис. 6.7, б).

Ось Ox проводят в направлении, противоположном направлению движения подачи. Ось Oz проводят в направлении главного

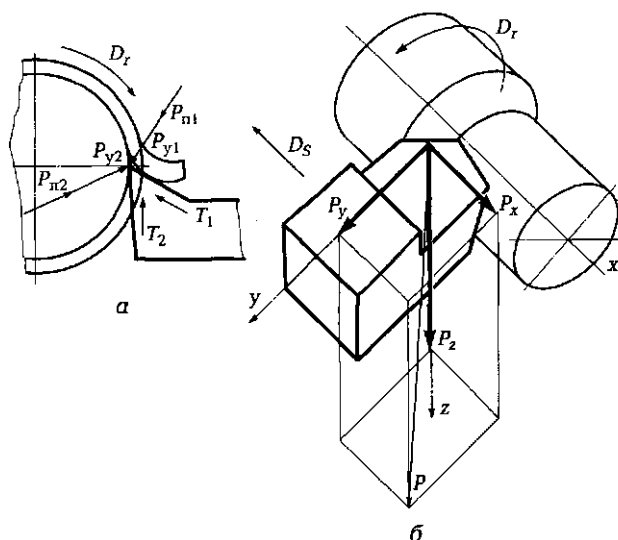


Рис. 6.7. Сила резания:

a — плоская система сил; b — разложение силы резания на составляющие; D_r — движение резания; D_s — движение подачи; P_{y1} и P_{y2} — реактивные силы упругой деформации по передней и задней поверхности соответственно; P_{n1} и P_{n2} — реактивные силы пластической деформации по передней и задней поверхности соответственно; P_z , P_x и P_y — главная, осевая и нормальная составляющие силы резания соответственно; T_1 и T_2 — силы трения

движения. Ось Oy проводят в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности. Полученные проекции равнодействующей силы резания P называют: P_z — главная составляющая силы резания; P_x — тангенциальная (осевая) составляющая силы резания; P_y — нормальная (радиальная) составляющая силы резания. Причем использование составляющих силы резания оказалось необычайно удобно. Во-первых, по силе P_z определяют параметры механизма главного движения станка, по силе P_x определяют параметры механизма подачи станка, сила P_y является одним из главных элементов расчета точности обработки. Во-вторых, соотношение составляющих силы резания для различных схем обработки и различных пар «материал заготовки — материал режущей части инструмента» достаточно стабильно. Например, для наружного точения низколегированных сталей быстрорежущим инструментом соотношение $P_z:P_y:P_x$ находится в пределах $1:(0,4...0,6):(0,2...0,4)$. Главную составляющую силы резания P_z определяют по эмпирической формуле

$$P_z = C_p t^{x_p} S^{y_p} v^{z_p} K_1 K_2 \dots K_i$$

где C_p — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; t — глубина резания, мм; S — подача, мм/об или мм/мин; v — скорость резания, м/мин; показатели степени x_p , y_p , z_p и коэффициенты K_1 , K_2 , ..., K_i учитывают факторы, не вошедшие в формулу.

Аналогичные формулы существуют и для расчета других составляющих силы резания.

6.1.9. Износ и стойкость режущего инструмента

Все физико-химические процессы, возникающие при резании металлов, приводят к изнашиванию режущего инструмента: трение стружки о переднюю поверхность, трение обработанной поверхности о заднюю приводят к абразивному изнашиванию, высокие значения температуры и давления в зоне резания и окисление материала передней поверхности приводят к адгезионному и окислительному изнашиванию и т.д.

Различают (рис. 6.8, а) износ по передней поверхности (вытирание лунки шириной b) и износ по задней поверхности (ленточка шириной h_z). По мере изнашивания инструмента ленточка шириной f уменьшается, и износ принимает катастрофический характер. Для различных инструментальных материалов и разных условий резания изнашивание инструмента протекает с различной интенсивностью, и одни виды износа могут превалировать над другими. Например, при точении быстрорежущими сталями при срезании тонких стружек (толщиной до 0,15 мм) преобладает изнашивание по главной задней поверхности; при обработке на больших скоростях и при срезании толстых стружек (толщиной свыше 0,5 мм) преобладает изнашивание по передней поверхности; при срезании стружек толщиной 0,15...0,5 мм одновременно происходит изнашивание по передней и задней поверхностям.

Для определения оптимального времени работы инструмента исследуют зависимость износа инструмента от времени его работы (рис. 6.8, б).

На диаграмме «износ — время» можно выделить зоны: 1 — зона приработки; 2 — зона нормального изнашивания; 3 — зона аварийного изнашивания. Время работы инструмента от переточки

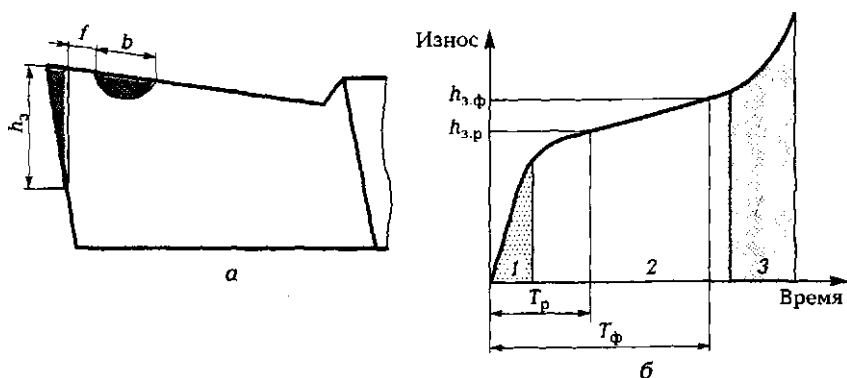


Рис. 6.8. Износ и стойкость режущего инструмента:

a — износ инструмента по задней (h_z) и передней (f, b) поверхностям; *б* — диаграмма «износ—время»: $h_{z,ф}$ и $h_{z,р}$ — соответственно физический и размерный износ по задней поверхности; $T_ф$ и T_p — соответственно физическая и размерная стойкость инструмента; 1 — зона приработки; 2 — зона нормального изнашивания; 3 — зона аварийного изнашивания

до переточки называют стойкостью. Физическая стойкость $T_ф$ — это время работы инструмента до аварийного изнашивания (инструмент изнашивается до величины $h_{z,ф}$). Но при чистовой обработке износ может существенно влиять на точность обработки, поэтому для чистовой обработки назначают так называемую размерную стойкость T_p (инструмент изнашивается до величины $h_{z,р}$, при которой происходит существенное влияние износа на точность обработки).

Различают минутную стойкость T_m — период работы в минутах, штучную стойкость $T_{шт}$ — количество обработанных деталей до переточки.

Наибольшее влияние на стойкость инструмента оказывает скорость резания, поэтому в расчетах стойкости чаще всего используется зависимость $S = vT^m$, где S — постоянная величина; v — скорость резания; T — стойкость; m — показатель относительной стойкости.

6.1.10. Смазочно-охлаждающие технологические жидкости

Современные смазочно-охлаждающие технологические жидкости (СОТЖ) — это сложные многокомпонентные соединения про-

дуктов нефтяного и химического производства, использование которых при обработке деталей повышает стойкость инструмента, уменьшает силу резания, улучшает качество обработанной поверхности, способствует удалению стружки из зоны резания. В основе действия СОТЖ лежат три основных эффекта: смазочный, охлаждающий и моющий.

Смазочный эффект — уменьшение сил адгезии и трения на поверхностях инструмента. Необходимым условием проявления этого эффекта является способность СОТЖ проникать между контактирующими поверхностями по капиллярам и образовывать пленки, уменьшающие коэффициент трения.

Охлаждающий эффект — снижение температуры в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом за счет уменьшения тепловыделения и увеличения теплоотвода. Уменьшение тепловыделения происходит благодаря влиянию СОТЖ на прочность отделяемого слоя материала, повышение его хрупкости, уменьшение работы, затрачиваемой на стружкообразование. Интенсивность теплоотвода в основном зависит от вязкости, теплопроводности и скорости движения СОТЖ, разности температур охлаждаемой поверхности и СОТЖ. При непрерывных процессах резания СОТЖ практически не достигает контактных поверхностей в зоне резания. Поэтому снижение температуры происходит только за счет охлаждения режущего инструмента и обрабатываемой детали. Следовательно, интенсивность охлаждения можно повысить за счет высоконапорной подачи СОТЖ, подачи СОТЖ со стороны задней поверхности или по специальным каналам, изготовленным в теле инструмента, подачи СОТЖ в виде тумана. При этом СОТЖ в виде эмульсии или в виде водных растворов имеют лучшие охлаждающие свойства по сравнению с масляными СОТЖ.

Моющий эффект — это обеспечение выноса из зоны резания стружки, продуктов изнашивания режущего инструмента и продуктов распада СОТЖ. Особенно важен этот эффект при выполнении финишных операций.

Неправильное применение СОТЖ может привести к отрицательным результатам (особенно при низких скоростях резания) вследствие химического и электрохимического взаимодействия СОТЖ с поверхностями инструмента и уменьшения защитного действия нароста при черновых операциях.

Сопоставление стойкости инструментов с охлаждением и без показывает, что существует пороговая скорость, ниже которой применение СОТЖ нежелательно. Так, для быстрорежущих ин-

струментов пороговой скоростью является скорость резания 10 м/мин, причем, чем больше сечение резца, тем ниже эта скорость. При применении твердосплавных инструментов значение пороговой скорости резания равно 80 м/мин при использовании распыленной СОТЖ и 100 м/мин при использовании охлаждения поливом.

В отечественной промышленности применяются два основных вида СОТЖ: масляные и водорастворимые (синтетические).

Масляные СОТЖ состоят из минерального масла (60...95 %) и присадок: антифрикционных, антизадирных, антитуманных, ингибиторов коррозии и др.

К основным маркам масляных СОТЖ относятся:

сульфофрезолы — осерненное минеральное масло средней вязкости, недостатком которых является то, что они вызывают коррозию цветных сплавов и негативно воздействуют на организм человека, а достоинством — только их дешевизна;

В-3М — средневязкое минеральное масло с антизадирными и антиизносными присадками, содержащими серу, фосфор и хлор, эффективно при обработке углеродистых и легированных сталей со скоростями резания более 50 м/мин;

МР-1У — маловязкое минеральное масло с антизадирными и антиизносными присадками, содержащими фосфор и хлор, эффективно при чистовой обработке углеродистых и легированных сталей.

Водорастворимые СОТЖ (эмульсолы) содержат 70...85 % минерального масла, эмульгаторы (вещества, облегчающие получение эмульсии) и присадки. Для уменьшения расходов на транспортировку и хранение эти СОТЖ выпускаются в виде концентрата, который по мере необходимости разбавляется потребителем до нужной концентрации водой. К основным маркам водорастворимых СОТЖ относятся:

Э-1, Э-2, Э-3 — эмульсолы с низкими технологическими свойствами;

ЭТ-2, обладающий лучшими технологическими свойствами и большей стабильностью состава;

Укриол-1, имеющий в своем составе ингибиторы коррозии и обладающий высокими технологическими свойствами, повышает стойкость твердосплавного инструмента (по сравнению с ЭТ-2) в 1,5—2 раза;

РЗ-СОЖ8 — эмульсол на базе ЭТ-2, активированного кристаллическим йодом, эффективен при обработке титановых сплавов.

6.1.11. Вибрации при резании материалов

Резание материалов всегда сопровождается вибрациями. Источником возбуждения колебаний в технологической системе станок — приспособление — инструмент — деталь (упругая технологическая система УТС) являются внешние воздействия (вынужденные колебания) и внутренние свойства системы УТС (автоколебания). При определенном уровне колебаний системы УТС процесс резания теряет устойчивость (управляемость), что отрицательно сказывается на точности, производительности и стоимости обработки. При этом появляется волнистость и увеличивается шероховатость обработанной поверхности, снижается размерная точность обработки, в десятки раз увеличиваются нагрузки на движущиеся элементы УТС, что определяет повышенный износ деталей станков, технологической оснастки, режущего инструмента (особенно твердосплавного и керамического), возможны поломки этих элементов и травмирование рабочих. Возникающий шум утомляет рабочих, приводит к снижению их внимания и ошибкам, ограничивается производительность работы оборудования.

Вынужденные колебания возникают под действием внешних возмущающих сил: прерывистый характер процесса резания (фрезерование, строгание, обработка прерывистых поверхностей и др.), неуравновешенность вращающихся масс УТС (роторов электродвигателей, шпинделя станка, режущих инструментов и др.), погрешности изготовления и сборки передач станка, работа рядом стоящего оборудования и т.д. Интенсивность вынужденных колебаний зависит от амплитуды, частоты и фазы возмущающей силы и явлений резонанса (степени совпадения частоты возмущающей силы и собственных частот УТС).

Борьба с вынужденными колебаниями заключается в устранении или уменьшении возмущающих сил, повышении жесткости и демпфирования (в общем виде повышение виброустойчивости) УТС, установке оборудования на виброгасящем фундаменте или виброгасящих опорах.

Автоколебания возникают, поддерживаются и управляются самим процессом резания. Основными причинами их появления являются изменение силы резания, наростообразование, упругие деформации в зоне резания, упругие деформации технологической оснастки, режущего инструмента и заготовки, изменение площади поперечного сечения срезаемого слоя, силы трения в зоне резания и др.

Борьба с автоколебаниями заключается в подборе соответствующих режимов резания, выборе режущего инструмента с правильной геометрией, правильной и жесткой установкой его на станке, изменении собственных частот УТС, применении виброгасящих устройств (демпферов).

Однако при обработке материалов вибрации можно использовать и с пользой для дела. При резании труднообрабатываемых материалов часто применяют **вибрационное резание**, сущность которого состоит в облегчении условий обработки за счет создания в УТС искусственных колебаний с регулируемой частотой, фазой, амплитудой и направлением. Источником искусственных колебаний обычно являются механические вибраторы или высокочастотные генераторы. Задается частота колебаний в пределах 0,2...20 кГц, амплитуда — 0,02...0,002 мм. Направление колебаний — в направлении движения подачи, движения резания или под углом к вектору скорости резания.

Вибрационное резание позволяет обеспечить устойчивое дробление стружки, снижает затраты на деформации и отделение срезаемого слоя, повышает точность обработки, однако иногда снижается стойкость режущего инструмента.

6.1.12. Точность обработки

Под точностью обработки понимается соответствие изготовленного изделия или партии изделий (детали, узла, машины) эталону, т.е. его (ее) чертежу. Применительно к обрабатываемым деталям различают размерную точность (соответствие размеров изделия чертежу); геометрическую точность (соответствие формы, волнистости и шероховатости поверхности требованиям чертежа); соответствие физико-химических свойств, структурного состояния поверхностных слоев (микротрещины, надрывы, измельченная структура), остаточных напряжений в поверхностных и глубинных слоях детали (глубина их проникновения, величина, знак) требованиям чертежа и т.д.

Размерная точность. В соответствии с требованиями Международной организации по стандартизации (ISO) в России весь диапазон размеров и допусков разбит на 19 квалитетов (от 01 до 17). Точные квалитеты (01, 0, 1) назначаются весьма редко, главным образом при изготовлении плоскопараллельных концевых мер длины. Квалитеты 1—4 применяются для изготовления рабочих и контрольных калибров. Обычные детали машин изготавливают по

4—12-му квалитетам. По грубым квалитетам (13—17) задаются допуски на свободные (неответственные или несопрягаемые) поверхности.

Геометрическая точность поверхности. Поверхность, ограничивающая деталь и отделяющая ее от окружающей среды, называется **реальной поверхностью**. Эта поверхность образуется при обработке и в отличие от **номинальной поверхности** (поверхности, указанной на чертеже) имеет неровности различной формы и высоты. Различают следующие погрешности геометрической точности: макрогеометрия (погрешности формы), волнистость и микрогеометрия (шероховатость).

Погрешности формы рассматривают на больших участках реальной поверхности (отношение шага неровностей к их высоте более 1 000). Под этим показателем понимается конусообразность, овальность, неплоскостность обработанной поверхности. Эти параметры должны укладываться в требования соответствующих стандартов России или в требования чертежа.

Шероховатость поверхности — совокупность неровностей, образующих рельеф поверхности (отношение шага неровностей к их высоте менее 50) и рассматриваемых в пределах определенного ее участка (так называемая базовая длина). Шероховатость поверхности после механической обработки — это прежде всего геометрический след режущего инструмента (лезвийного или абразивного), искаженный в результате пластических и упругих деформаций в зоне резания и в срезаемом слое и вибраций, возбуждаемых в системе УТС. Шероховатость характеризуется средним арифметическим отклонением профиля от среднего значения (R_a) и высотой неровностей по пяти выступам и впадинам поверхности (R_z). Установлено 14 классов шероховатости поверхности.

Классы шероховатости 1—3 имеют грубые поверхности заготовок и поверхности, получаемые при обдирочном точении, строгании, фрезеровании, сверлении.

Классы шероховатости 4—6 имеют поверхности, полученные полустрогальной обработкой.

Классы шероховатости 7—9 имеют поверхности, полученные тонким точением, абразивной обработкой, отделочными и электрофизическими методами, поверхностным пластическим деформированием.

Поверхности, обработанные доводочными инструментами (притирка, хонингование, суперфиниширование, алмазное выглаживание и др.), имеют 10—14-й классы шероховатости.

Волнистость представляет собой совокупность периодически повторяющихся впадин и неровностей с отношением шага неровностей к их высоте менее 1 000 и не более 50. Волнистость занимает промежуточное положение между погрешностью формы и шероховатостью.

Физико-механическое состояние обработанной поверхности. Поверхностные слои детали после механической обработки пластически деформированы, поэтому физическое состояние этих слоев в основном характеризуется деформационными изменениями, следствием которых являются деформационное упрочнение (наклеп) поверхности и степень деформации отдельных зерен.

Наклеп поверхностного слоя оценивается по глубине h_n и степени u_n наклепа. Интенсивность наклепа оценивается по градиенту наклепа $u_{гр}$:

$$u_n = 100(H_{\max} - H_{исх})/H_{исх}; u_{гр} = (H_{\max} - H_{исх})/h_n,$$

где H_{\max} и $H_{исх}$ — максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя металла.

Деформационное упрочнение поверхностного слоя зависит от пластических свойств обрабатываемого металла, режимов резания, геометрии и износа режущего инструмента, условий обработки.

По мере увеличения скорости резания детали глубина наклепа возрастает. Однако при скоростях 200...600 м/мин возникает явление разупрочнения, которое уменьшает глубину наклепа. При обработке легированных сталей, имеющих низкие пластические свойства, остаточные напряжения сжатия образуются при скоростях резания 500...600 м/мин. При обработке стали 20 и стали 45 режущим инструментом с отрицательными передними углами остаточные напряжения сжатия образуются при скоростях резания 500...800 м/мин.

При увеличении скорости движения подачи возрастают величина наклепа и остаточные напряжения. Применение режущих инструментов с отрицательными передними углами ($-15...-45^\circ$) практически всегда приводит к образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. К уменьшению глубины наклепа приводят увеличение заднего угла в пределах от 3 до 15° или уменьшение главного угла в плане от 90 до 45° и доводка передней и задней поверхностей режущего инструмента. Увеличение радиуса округления режущей кромки влечет возрастание глубины наклепа и остаточных напряжений. Повышение твердости обрабатываемого материала уменьшает объем, подвергаемый пластической деформации.

**6.2.1. Классификация металлорежущих
станков**

Металлорежущие станки можно классифицировать по отдельным признакам или по комплексу признаков.

По технологическому назначению различают станки токарной, фрезерной, сверлильной и других групп.

По степени универсальности различают станки универсальные, широкого применения, специализированные и специальные. Универсальные станки предназначены для выполнения разнообразных работ по обработке различных деталей. Станки широкого назначения предназначены для выполнения определенных работ по обработке деталей определенных наименований. Специализированные станки предназначены для обработки деталей одного наименования, но разных размеров (например, обработка зубчатого венца на зубофрезерном станке). Специальные станки выполняют вполне определенный вид работ на одной определенной детали.

По степени автоматизации различают станки с ручным управлением, полуавтоматы, автоматы, станки с программным управлением. Автомат — станок, у которого для возобновления цикла обработки не требуется вмешательства человека. Если для возобновления цикла обработки нужно только нажать кнопку «Пуск», то формально это станок-полуавтомат.

По числу главных рабочих органов различают одно- и многошпиндельные станки, одно- и многопозиционные станки и т.д.

По точности станка различают пять классов точности: Н — нормальный, П — повышенный, В — высокий, А — особо высокой точности, С — особо точные станки.

В российском машиностроении принята Единая система условных обозначений станков, разработанная в ЭНИМС. В соответствии с этой системой, каждому станку присваивается определенный шифр. Первые две цифры шифра определяют группу и тип станка. Буква на втором или третьем месте позволяет различить станки одного типоразмера, но с разными техническими характеристиками. Третья или четвертая цифра показывают условный типоразмер станка. Последняя буква указывает на различные модифи-

кации станков одной базовой модели. Все металлорежущие станки разбиты на 10 групп, а каждая группа — на 10 типов. Далее номер и название группы указаны курсивом, а тип указан в скобках.

Группа 0 — *резервная*.

Группа 1 — *токарные станки* (0 — специализированные автоматы и полуавтоматы; 1 — одношпиндельные автоматы и полуавтоматы; 2 — многошпиндельные автоматы и полуавтоматы; 3 — револьверные; 4 — сверлильно-отрезные; 5 — карусельные; 6 — токарные и лобовые; 7 — многорезцовые; 8 — специализированные; 9 — разные токарные).

Группа 2 — *сверлильные и расточные станки* (0 — резервный; 1 — вертикально-сверлильные; 2 — одношпиндельные полуавтоматы; 3 — многошпиндельные полуавтоматы; 4 — координатно-расточные; 5 — радиально-сверлильные; 6 — горизонтально-расточные; 7 — алмазно-расточные; 8 — горизонтально-сверлильные; 9 — разные сверлильные).

Группа 3 — *шлифовальные и доводочные станки* (0 — резервный; 1 — круглошлифовальные; 2 — внутришлифовальные; 3 — обдирочные шлифовальные; 4 — специализированные шлифовальные; 5 — резервный; 6 — заточные; 7 — плоскошлифовальные; 8 — притирочные и полировочные; 9 — разные, работающие абразивом).

Группа 4 — *комбинированные станки*.

Группа 5 — *зубо- и резьбообрабатывающие станки* (0 — резбонарезные; 1 — зубострогальные для цилиндрических колес; 2 — зуборезные для конических колес; 3 — зубофрезерные; 4 — для нарезания червячных пар; 5 — для обработки торцов зубьев; 6 — резьбофрезерные; 7 — зубоотделочные и поверочные; 8 — зубо- и резьбошлифовальные; 9 — разные зубо- и резьбообрабатывающие станки).

Группа 6 — *фрезерные станки* (0 — резервный; 1 — вертикальные консольные; 2 — непрерывного действия; 3 — резервный; 4 — копировальные и гравировальные; 5 — вертикальные бесконсольные; 6 — продольные; 7 — консольные широкоуниверсальные; 8 — горизонтальные консольные; 9 — разные фрезерные).

Группа 7 — *строгальные, долбежные, протяжные* (0 — резервный; 1 — продольно-строгальные одностоечные; 2 — продольно-строгальные двухстоечные; 3 — поперечно-строгальные; 4 — долбежные; 5 — протяжные горизонтальные; 6 — резервный; 7 — протяжные вертикальные; 8 — резервный; 9 — разные строгальные).

Группа 8 — *разрезные станки* (0 — резервный; 1 — разрезные, работающие резцом; 2 — разрезные, работающие абразивом).

ным кругом; 3 — разрезные, работающие гладким диском; 4 — правильно-отрезные; 5 — пилы ленточные; 6 — пилы дисковые; 7 — пилы ножовочные).

Группа 9 — разные станки (1 — опилочные; 2 — пилонасекательные; 3 — правильно- и бесцентрово-обдирочные; 4 — балансировочные; 5 — для испытания сверл и шлифовальных кругов; 6 — делительные машины).

Условный типоразмер станка обычно показывает наибольший размер обрабатываемой заготовки. Например: универсальный токарно-винторезный станок мод. 16К20: «20» — высота центров, т.е. расстояние от оси вращения заготовки до направляющих 200 мм; вертикально-сверлильный станок мод. 2Н145: «45» — наибольший диаметр сверления — 45 мм.

6.2.2. Кинематика станков

Привод металлорежущего станка — это совокупность механизмов, обеспечивающих заданные законы движения исполнительных органов станка. Различают механические, электрические, гидравлические и пневматические механизмы привода. Элементами механического привода станков являются валы, оси, зубчатые колеса, шкивы, муфты и т.д. На кинематических схемах все они имеют определенное условное обозначение (табл. 6.6). По назначению механизмы привода делятся на двигатели, механизмы для передачи преобразования, реверсирования и регулирования скорости движений.

Передающие механизмы передают движение от одного элемента к другому. Различают ременные, цепные, зубчатые и червячные передачи.

Ременная передача (рис. 6.9, а) состоит из ведущего вала 1 (со шкивом диаметром d_1), ведомого вала 2 (со шкивом диаметром d_2) и ремня 3 (плоского или клинового). Ее передаточное отношение $i = (n_2/n_1)\eta_p = (d_1/d_2)\eta_p$, где n_1, n_2 — частота вращения ведущего и ведомого шкивов; η_p — коэффициент проскальзывания ремня относительно поверхности шкивов, $\eta_p = 0,9 \dots 0,96$.

Цепная передача (рис. 6.9, б) состоит из ведущего вала 1 со звездочкой z_1 , ведомого вала 2 со звездочкой z_2 и цепи 3. Ее передаточное отношение $i = n_2/n_1 = z_1/z_2$.

Зубчатая передача цилиндрическая (рис. 6.9, в) и коническая (рис. 6.9, г) состоят из ведущего вала 1 с шестерней z_1 и ведомого вала 2 с шестерней z_2 . Ее передаточное отношение $i = n_2/n_1 = z_1/z_2$.

Таблица 6.6. Условные обозначения основных элементов механического привода

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Вал, ось, стержень		Патрон: ■ трехкулачковый	
Конец шпинделя для центровых работ		■ четырех- или шестиклачковый	
Передача винт — гайка		Муфта: ■ кулачковая односторонняя	
Подшипник: ■ без уточнения типа		■ фрикционная односторонняя	
■ радиальный качения		■ фрикционная электромагнитная	
■ радиальный скольжения		Соединение детали с валом: ■ неподвижное	
Соединение двух валов: ■ жесткое		■ свободное для вращения	
■ телескопическое		■ с помощью вытяжной шпонки	
■ эластичное		■ подвижное вдоль оси	

Червячная передача (рис. 6.9, *г*) состоит из ведущего вала 1 с червяком, имеющим k заходов, и ведомого вала 2 с червячным колесом, имеющим z зубьев. Ее передаточное отношение $i = n_2/n_1 = k/z$.

Механизмы для преобразования движения. Для преобразования вращательного движения в поступательное в основном применяют реечную (рис. 6.9, *е*) и винтовую (рис. 6.9, *ж*) передачи.

Реечная передача состоит из зубчатого колеса 5, имеющего z зубьев, и зубчатой рейки 4. Если модуль реечного зацепления m , то за один оборот колеса рейка переместится на величину $S = \pi m z$.

Винтовая передача состоит из вращающегося ходового винта 7, имеющего шаг t , и ходовой гайки 6. За один оборот ходового винта, имеющего k заходов, гайка переместится в осевом направлении на величину $S = tk$.

Механизмы для регулирования скорости движения. Ступенчатое изменение скорости обеспечивается двух-, трех- и четырех-скоростными асинхронными электродвигателями или за счет применения набора зубчатых колес (так называемых редукторов).

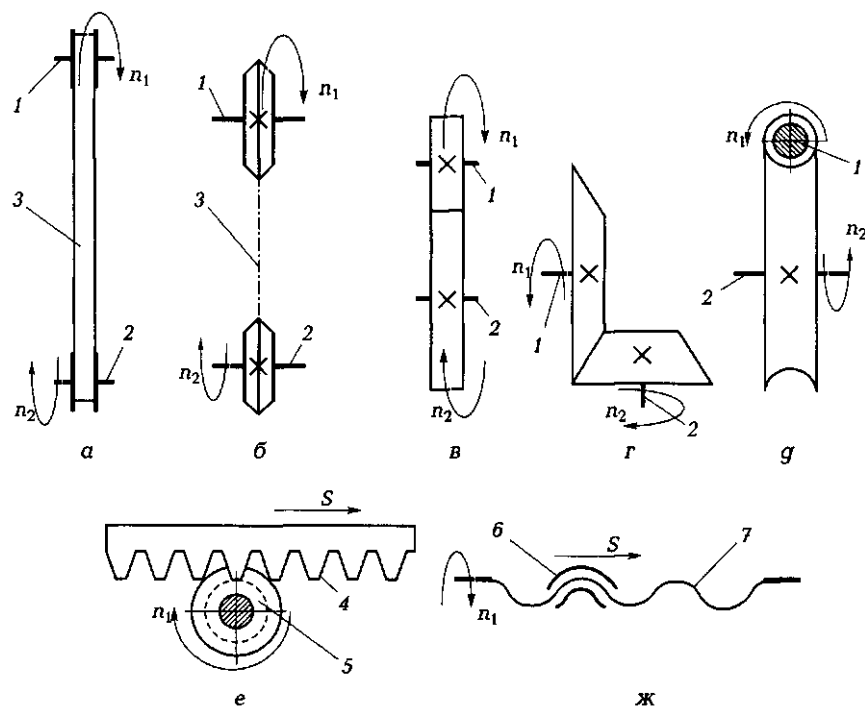


Рис. 6.9. Основные виды передач:

а — ременная; б — цепная; в — зубчатая цилиндрическая; г — зубчатая коническая; г — червячная; е — реечная; ж — винтовая; 1 — ведущий вал; 2 — ведомый вал; 3 — промежуточный элемент (ремень или цепь); 4 — рейка; 5 — зубчатое колесо; 6 — ходовая гайка; 7 — ходовой винт; n_1, n_2 — частота вращения ведущего и ведомого валов соответственно; S — линейное перемещение

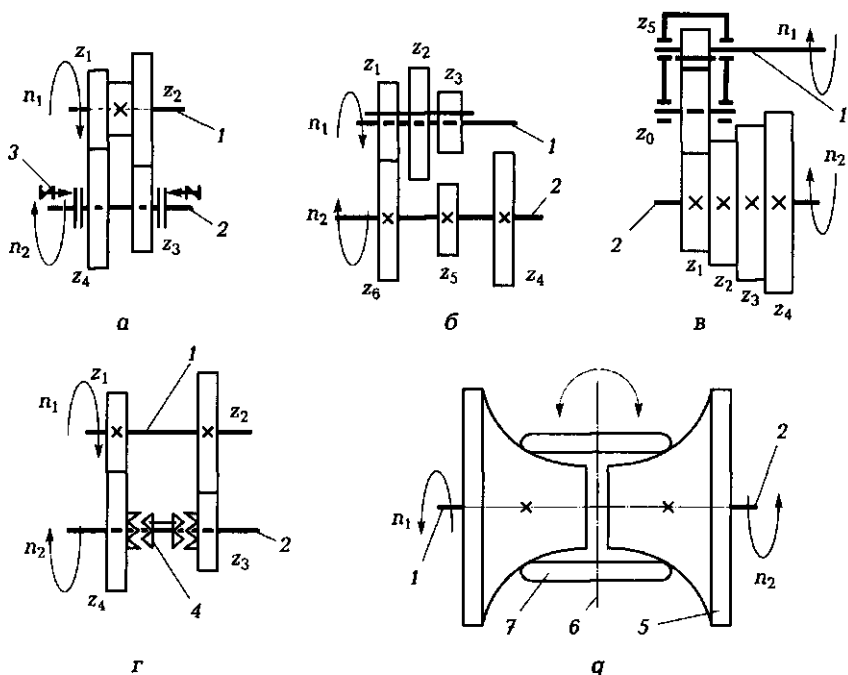


Рис. 6.10. Механизмы для регулирования скорости движения:

а — редуктор с дистанционным переключением передач; *б* — редуктор с механическим переключением передач; *в* — редуктор с использованием конуса Нортон; *г* — редуктор с механической двусторонней муфтой; *г* — вариатор; 1 — ведущий вал; 2 — ведомый вал; 3 — фрикционная электромагнитная муфта; 4 — кулачковая двусторонняя муфта; 5 — шкив; 6 — ось; 7 — ролик; z_0 — z_6 — зубчатые колеса; n_1 , n_2 — частота вращения ведущего и ведомого валов

Редуктор с дистанционным переключением передач (рис. 6.10, *а*). Движение ведущего вала 1, вращающегося с постоянной частотой n_1 , передается на ведомый вал 2 через две пары зубчатых колес (z_1, z_4) и (z_2, z_3). Дистанционное включение нужной пары производится фрикционными электромагнитными муфтами 3. Следовательно: $n_2 = n_1 z_4 / z_1$ или $n_2 = n_1 z_3 / z_2$.

Редукторы с механическим переключением передач. На рис. 6.10, *б* показан редуктор с использованием блока. Блок прямозубых зубчатых колес (z_1, z_2, z_3) перемещается по шпонке или шлицам ведущего вала 1. На ведомом валу 2 закреплены колеса z_4, z_5, z_6 . В зависимости от положения блока прямозубых зубчатых колес частота вращения ведомого вала будет равна $n_2 = n_1 z_6 / z_1$, или $n_2 = n_1 z_5 / z_2$, или $n_2 = n_1 z_4 / z_3$. На рис. 6.10, *в* показан редуктор с исполь-

зованием конуса Нортон. На ведущем валу 1 закреплен набор — так называемый конус — прямозубых зубчатых колес (z_1, z_2, z_3, z_4). Прямозубое колесо z_3 перемещается по шпонке или шлицам ведомого вала 2. Движение с вала 1 на вал 2 передается через промежуточное колесо z_0 . В зависимости от положения колеса z_3 частота вращения ведомого вала будет равна $n_2 = n_1 z_5 / z_1$, или $n_2 = n_1 z_5 / z_2$, или $n_2 = n_1 z_5 / z_3$, или $n_2 = n_1 z_5 / z_4$. На рис. 6.10, г показан редуктор с механической двусторонней кулачковой муфтой-синхронизатором. Достоинством такого решения будет возможность применения косозубых или шевронных зубчатых колес, что существенно снизит габаритные размеры и массу редуктора. Работа редуктора аналогична работе редуктора, показанного на рис. 6.10, а, только переключение передач осуществляется за счет перемещения кулачковой муфты 4 по шлицам ведомого вала 2.

Бесступенчатое изменение скорости возможно за счет применения вариаторов (рис. 6.10, г). В вариаторе шкивы 5 закреплены соответственно на ведущем 1 и ведомом 2 валах. Ролики 7 закреплены на оси 6. При повороте оси роликов на угол $\pm \phi$ обеспечивается плавное изменение частоты вращения ведомого вала.

Реверсивные механизмы. Изменение направления вращения всего привода возможно за счет переключения фаз асинхронного электродвигателя, изменением полярности подключения электродвигателя постоянного тока или применением зубчатых механиз-

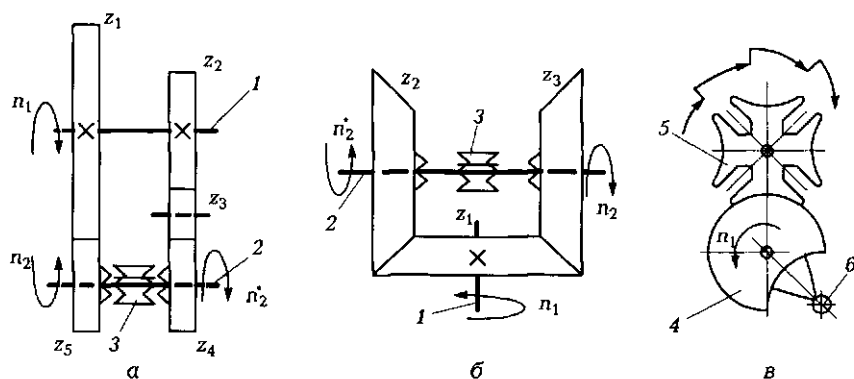


Рис. 6.11. Реверсивные и делительные механизмы:

а — с цилиндрическими зубчатыми колесами; б — с коническими зубчатыми колесами; в — мальтийский крест; 1 — ведущий вал; 2 — ведомый вал; 3 — кулачковая муфта; 4 — водило; 5 — мальтийский крест; 6 — палец; $z_1 - z_5$ — зубчатые колеса; n_1, n_2 — частота вращения ведущего и ведомого валов соответственно; n_2^* — частота вращения реверса

мов. В механизмах с цилиндрическими зубчатыми колесами (рис. 6.11, а) реверсирование движения осуществляется за счет перемещения по шлицам ведомого вала 2 кулачковой муфты 3. Для передачи движения с ведущего вала 1 (частота вращения n_1) на вал 2 применяется паразитное зубчатое колесо z_3 . Частота прямого вращения ведомого вала равна $n_2 = n_1 z_5 / z_1$. Частота обратного вращения ведомого вала равна $n_2' = n_1 z_4 / z_2$. В механизмах с коническими зубчатыми колесами (рис. 6.11, б) используется аналогичный принцип реверсирования, но паразитное зубчатое колесо не требуется.

Делительные механизмы. Поворот на заданный угол заготовки или элемента станка (деление) осуществляют с помощью шаговых электродвигателей, оптических или механических делительных головок. Достаточно часто используется мальтийский крест (рис. 6.11, в). В нем непрерывное вращательное движение водила 4, закрепленного на ведущем валу, преобразуется (через палец 6) в прерывистое вращательное движение мальтийского креста 5. У равномерного мальтийского креста угол поворота за один оборот водила равен $360^\circ / z$, где z — число пазов на мальтийском кресте.

6.3. ТОЧЕНИЕ

Точение — лезвийная обработка резанием поверхностей вращения и торцевых поверхностей; главное движение, вращательное, придается заготовке, движение подачи, поступательное, придается режущему инструменту в направлении вдоль, перпендикулярно или под углом к оси вращения заготовки. Обработку наружных поверхностей называют **точением**, или **обтачиванием**, обработку внутренних поверхностей называют **растачиванием**.

6.3.1. Характеристика методов точения

Обтачивание цилиндрических поверхностей (рис. 6.12, а—в) производится прямыми или отогнутыми резцами с продольным движением подачи D_3 . При этом используют различные проходные резцы для того, чтобы получить разные по форме переходные поверхности. Обычно перед обтачиванием наружных поверхностей *погрезают торцы* заготовки (рис. 6.12, г). Обработка производится подрезными резцами с поперечным движением подачи к центру или от центра заготовки. При подрезании к центру

торец получается слегка вогнутым, при подрезании от центра торец получается слегка выпуклым, но шероховатость поверхности меньше.

Протачивание канавок (рис. 6.12, *г, е*) проводится с поперечным движением подачи специальными резцами, у которых форма и размеры главной режущей кромки соответствуют протачиваемой канавке. **Отрезание** обработанной детали (рис. 6.12, *ж*) проводится отрезными резцами с прямой или наклонной главной режущей кромкой. В последнем случае торец отрезанной детали получается более чистым.

Растачивание внутренних цилиндрических поверхностей (рис. 6.12, *з, и*) выполняют расточными резцами, закрепленными в резцедержателе в направлении оси заготовки, с продольной подачей. Растачивание гладких сквозных отверстий проводят проходными резцами (см. рис. 6.12, *з*), а ступенчатых и глухих — упорными расточными резцами (см. рис. 6.12, *и*).

Сверление, зенкерование и развертывание центральных отверстий (рис. 6.12, *к*) выполняют соответствующим режущим инструментом, закрепленным в пиноли задней бабки (узлы станка см. на рис. 6.15). При этом задняя бабка закреплена на направляющих станины, а перемещение пиноли с инструментом осуществляется вручную.

Нарезание резьбы (рис. 6.12, *л*) проводится специальными резьбовыми резцами. Форма режущих кромок резцов определяется профилем и размерами поперечного сечения нарезаемых резьб. Суппорт получает продольное перемещение от ходового винта для повышения точности движения инструмента относительно заготовки. Величина подачи при этом должна быть равна шагу нарезаемой резьбы, а кинематическую цепь «ходовой винт — гайка» не разрывают при прямом (рабочем) и обратном ходе суппорта.

Обработка конических поверхностей может проводиться несколькими способами. *Широкими токарными резцами* с продольным или поперечным движением подачи (рис. 6.12, *м*) получают поверхности с длиной образующей не более 30 мм. Используют способ при снятии фасок с обработанных цилиндрических поверхностей. *Поворотом поворотных салазок суппорта* на угол, равный половине угла при вершине требуемого конуса (рис. 6.12, *н*), обработку ведут с ручной подачей резца. Длина обрабатываемой таким способом образующей конуса определяется величиной хода каретки верхних поворотных салазок. *Смещением корпуса задней бабки в поперечном направлении* (рис. 6.12, *о*) обрабатывают длинные конические поверхности с углом конуса α не более 8° .

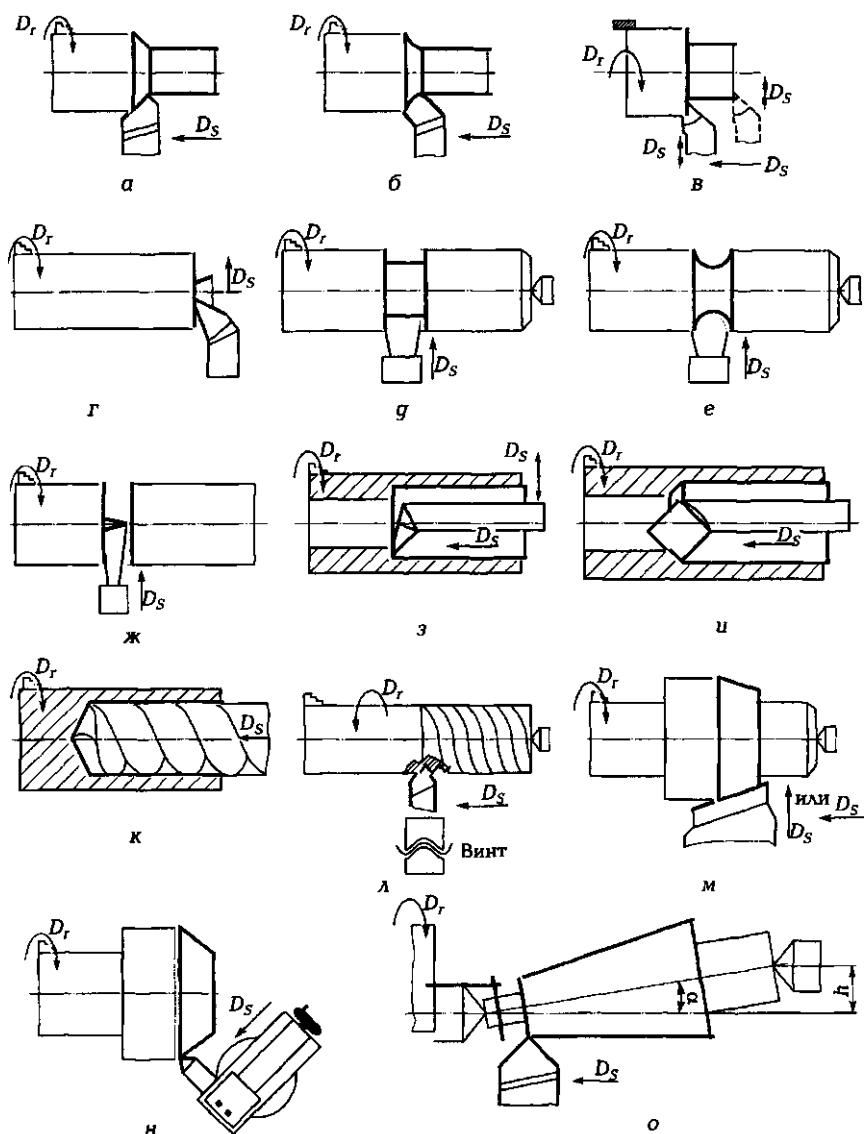


Рис. 6.12. Основные схемы обработки заготовок на универсальном токарно-винторезном станке:

а — в — обтачивание наружных цилиндрических поверхностей; г — подрезание торцов; д, е — протачивание прямых и фасонных канавок соответственно; ж — отрезание; з, и — растачивание гладких и ступенчатых отверстий соответственно; к — сверление; л — нарезание резьбы; м — точение конусов с поперечной подачей; н, о — точение коротких и длинных конических поверхностей соответственно; D_r — движение резания; D_s — движение подачи; h — смещение задней бабки; α — угол поворота оси заготовки

Для этого корпус задней бабки смещают относительно ее основания на величину h в направлении, перпендикулярном линии центров станка. Обрабатываемую заготовку устанавливают на шариковые центры. При этом ось вращения заготовки располагается под углом α к линии центров станка, а образующая конической поверхности — параллельно линии центров станка.

6.3.2. Токарные резцы

По технологическому назначению различают резцы проходные (рис. 6.13, а—в) — для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей, подрезные (рис. 6.13, г) — для обтачивания плоских торцов, расточные — для растачивания сквозных (рис. 6.13, г) и глухих (рис. 6.13, е) отверстий, отрезные (рис. 6.13, ж), прорезные, или канавочные (рис. 6.13, з), — для точения наружных кольцевых канавок, резьбовые (рис. 6.13, и) — для нарезания резьб, фасонные круглые (рис. 6.13, к) и призматические (рис. 6.13, л) — для обработки фасонных поверхностей и т.д. По форме головки различают резцы прямые (см. рис. 6.13, а),

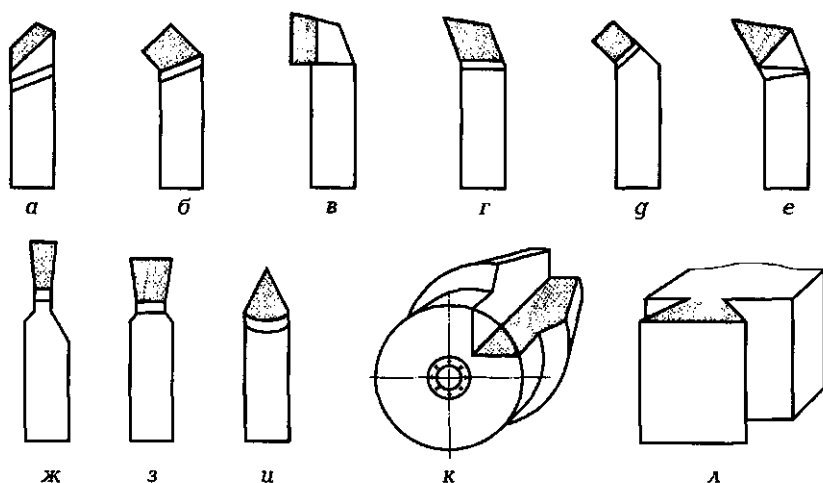


Рис. 6.13. Токарные резцы:

а — проходной прямой; б — проходной с изогнутой головкой; в — проходной упорный; г — подрезной; г, е — расточные для сквозных и глухих отверстий соответственно; ж — отрезной; з — лопаточный (прорезной, или канавочный); и — резьбовой; к — фасонный круглый; л — фасонный призматический

отогнутые (см. рис. 6.13, б) и оттянутые (см. рис. 6.13, ж). По характеру обработки различают резцы для чернового, получистового, чистового точения. По типу инструментального материала и способу его крепления на головке различают резцы цельные из углеродистых сталей «самокальные», цельные из быстрорежущих сталей, с напаянной пластиной из быстрорежущей стали или из твердого сплава, с механическим креплением пластины из твердого сплава или кристалла сверхтвердого материала. По виду пластины из твердого сплава различают резцы с перетачиваемыми трех- и четырехгранными пластинами и с неперетачиваемыми трех-, четырех-, пяти- и шестигранными пластинами.

6.3.3. Рабочие приспособления для токарной обработки

Характер базирования и закрепления заготовки в рабочих приспособлениях токарных станков зависит от типа станка, вида обрабатываемой поверхности, типа заготовки (вал, диск, кольцо, некруглый стержень и др.), отношения длины заготовки к ее диаметру, требуемой точности обработки и т.д.

При обработке круглых стержней на универсальных токарных станках чаще всего применяется трех- или шестикулачковый самоцентрирующий патрон (рис. 6.14, а). Патрон состоит из корпуса 1, в радиальных пазах которого перемещаются кулачки 3. В корпусе патрона размещена коническая зубчатая передача, на торце одного из конических колес выполнена канавка в виде спирали Архимеда. Кулачки также имеют выступы в виде спирали Архимеда. При вращении шестерни кулачки одновременно перемещаются к центру или от центра патрона, что обеспечивает центрирование заготовки 2 относительно оси вращения патрона. При необходимости установки заготовки эксцентрично относительно оси ее вращения применяют четырехкулачковый патрон, в котором каждый кулачок перемещается независимо от остальных. При отношении длины заготовки к ее диаметру 4...10 консольное закрепление заготовки (только в патроне) неприменимо — необходима поддержка второго ее конца. В торце заготовки предварительно просверливают (специальным центровочным сверлом) коническое отверстие, в которое вставляют задний центр. Центры выполняют с неподвижной или подвижной конусной частью (рис. 6.14, б). Конусная часть неподвижного центра выполняется из легированных сталей или в виде вставки из твердого сплава. Центры с подвиж-

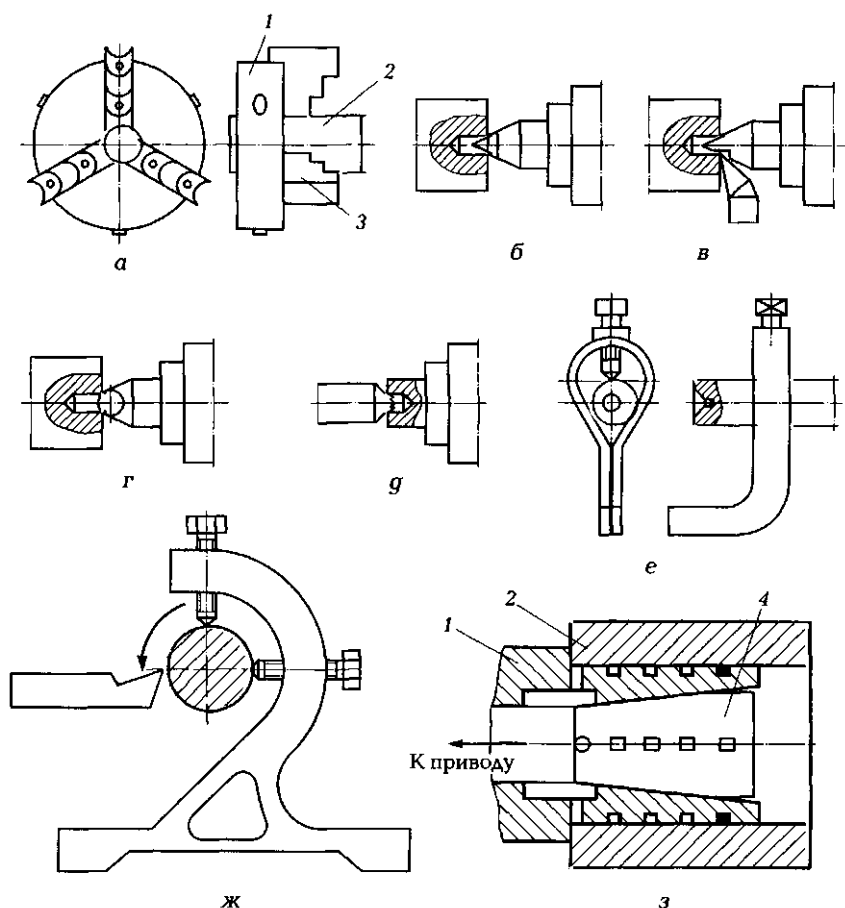


Рис. 6.14. Рабочие приспособления, применяемые в токарных станках:

а — трехкулачковый патрон; *б* — неподвижный центр; *в* — срезанный центр; *г* — шариковый центр; *г* — обратный центр; *е* — хомутик; *ж* — неподвижный люнет; *з* — цанговый патрон; *1* — корпус; *2* — заготовка; *3* — кулачки; *4* — конус

ной конусной частью применяют при точении с большими толщинами срезаемого слоя или при больших скоростях резания. При обработке торца заготовки, установленной в центрах, применяют срезанный центр (рис. 6.14, *в*). При обточке конических поверхностей методом смещения задней бабки заготовку устанавливают в шариковом центре (рис. 6.14, *г*). При обработке некрупных заготовок последнюю устанавливают в обратных центрах (рис. 6.14, *г*). Часто заготовку базируют в двух центрах. В этом случае заготовку

приводят во вращение хомутиком (рис. 6.14, е). Хомутик надевают на заготовку, а его загнутый конец упирают в кулачок токарного патрона. При установке переднего центра в токарном патроне коническую часть центра перед обработкой обязательно протачивают. При отношении длины заготовки к ее диаметру больше 10 заготовке необходима третья опора, в качестве которой применяют подвижные или неподвижные люнеты. Неподвижный люнет (рис. 6.14, ж) устанавливают на станине, подвижный — на продольных салазках суппорта. Для обработки заготовок на станках с полуавтоматическим или автоматическим циклом применяют цанговые патроны. На рис. 6.14, з показан цанговый патрон для базирования и закрепления заготовки по отверстию. Заготовка 2 устанавливается на корпусе 1, имеющем упругие лепестки с внутренним конусом. При осевом перемещении конуса 4 лепестки зажимают заготовку. Привод патрона может быть механическим (винтовой или пружинный), гидравлическим или пневматическим. Для базирования и закрепления нежестких втулок по отверстию применяют патроны, различные оправки (цилиндрические с запрессовкой заготовки, конические, упругие оправки с гидропластмассой, тарельчатыми пружинами, гофрированными втулками).

6.3.4. Обработка заготовок на станках токарной группы

На *универсальном токарно-винторезном станке* можно обрабатывать детали различных классов (круглые и некруглые стержни, кольца, диски, корпусные детали и т.п.). Основные схемы обработки показаны на рис. 6.12.

Универсальный токарно-винторезный станок (рис. 6.15) устанавливается на станине 18, представляющей собой массивную базовую чугунную деталь на двух тумбах, передней 16 и задней 12. В передней тумбе установлен главный электродвигатель, в задней — насос и резервуар для СОТЖ. Верхняя часть станины имеет две пары направляющих для базирования и перемещения подвижных элементов станка. Передняя бабка 1 закреплена на левой части станины. В корпусе передней бабки расположена коробка скоростей и шпиндель 2. Шпиндель — это полый вал, на правом резьбовом конце которого устанавливается технологическая оснастка для базирования и закрепления заготовок (трехкулачковый самоцентрирующий патрон 3, четырехкулачковый патрон, планшайба и т.д.). Шпиндель получает вращение (главное движе-

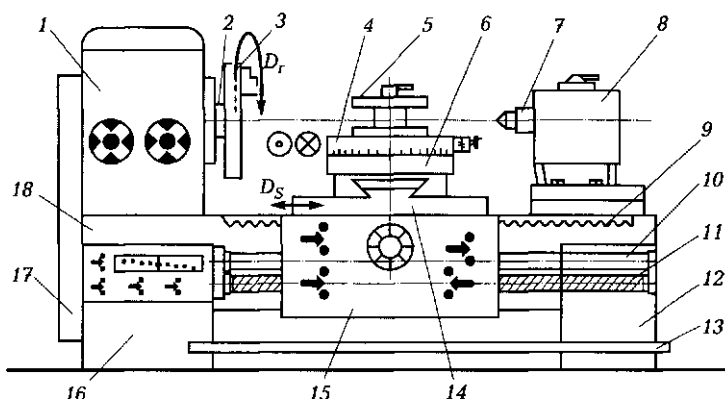


Рис. 6.15. Универсальный токарно-винторезный станок:

1 — передняя бабка; 2 — шпиндель; 3 — трехкулачковый патрон; 4 — поворотные салазки; 5 — резцедержатель; 6 — поперечные салазки; 7 — пиноль; 8 — задняя бабка; 9 — рейка; 10 — ходовой вал; 11 — ходовой винт; 12 — задняя тумба; 13 — поддон; 14 — продольные салазки; 15 — фартук; 16 — передняя тумба; 17 — гитара подачи; 18 — станина; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

ние D_r) от главного электродвигателя через клиноременную передачу, систему зубчатых колес и муфт, размещенных на валах коробки скоростей, расположенной внутри передней бабки. Задняя бабка 8 установлена на правой части станины с возможностью перемещения по ее внутренним направляющим. Задняя бабка необходима для повышения жесткости закрепления длинных валов. Внутри задней бабки размещена выдвижная пиноль 7, в конусное отверстие которой вставляются различные центры (неподвижный, вращающийся, плавающий, центр-пробка и др.). При обработке длинных валов (отношение длины к диаметру более 4) передний конец заготовки устанавливается в патрон, закрепленный на шпинделе, а задний конец поджимается центром, установленным в пиноли задней бабки. При обработке коротких заготовок, заготовок типа «некруглый стержень» или корпусных заготовок в конусное отверстие пиноли устанавливается осевой инструмент (сверло, зенкер, развертка и др.), что позволяет производить осевую обработку центрального отверстия в заготовке. Движение подачи при этом осуществляется вручную вращением маховика задней бабки.

На наружных направляющих станины размещается суппорт, состоящий из резцедержателя 5, поворотных салазок 4, поперечных салазок 6, продольных салазок 14 и фартука 15. В четырехпо-

зиционном резцедержателе устанавливаются режущие инструменты — токарные резцы. Поворотные салазки установлены с возможностью поворота и фиксации вокруг вертикальной оси, что позволяет обрабатывать короткие (до 150 мм) конусные поверхности с большими углами конусности (до 45°). При обработке длинных конусных поверхностей с малыми углами конусности (до 5°) смещают ось вращения заготовки, перемещая заднюю бабку перпендикулярно направляющим станины. Поперечные салазки позволяют придать режущему инструменту движение подачи D_z под углом 90° к оси вращения заготовки (поперечная подача). Продольные салазки позволяют придать режущему инструменту движение подачи D_z под углом 0° к оси вращения заготовки (продольная подача). Движение подачи осуществляется вручную или автоматически. На передней стенке станины закреплена коробка подач, кинематически связанная со шпинделем системой зубчатых колес, установленных в гитаре подач 17. Коробка подач передает движение на ходовой вал 10 и ходовой винт 11. Ходовой винт служит для обеспечения автоматической подачи только при нарезании резьбы, для обеспечения автоматической подачи при других работах служит ходовой вал. Для преобразования вращения ходового вала или ходового винта в прямолинейное перемещение служат механизмы, размещенные в фартуке (механизм типа «винт — гайка» для поперечной или продольной подачи при резьбонарезании, механизм типа «рейка — колесо» для других работ). При этом рейка 9 установлена на передней части станины. Для сбора стружки и СОТЖ в нижней части станины установлен поддон 13.

Универсальный токарно-винторезный станок позволяет установить не более пяти режущих инструментов (четыре — в резцедержателе и один — осевой — в пиноли задней бабки). Для изготовления партии деталей с большим объемом токарной обработки универсальные станки малопригодны, так как требуется много времени на установку и наладку режущего инструмента.

Для обработки партии сложных деталей (ступенчатый валик, фланец, кольцо) применяют **токарно-револьверные станки**. В токарно-револьверном станке несколько режущих инструментов устанавливают в так называемой револьверной головке, что позволяет сократить время на установку и наладку инструментов. В *прутковых револьверных станках* заготовку (пруток различного сечения) зажимают в пустотелом цанговом патроне. После изготовления детали ее отрезают, протягивают оставшуюся часть прутка через полое осевое отверстие цангового патрона и обрабатывают следующую деталь.

В **патронных револьверных станках** обрабатывают штучные заготовки, зажимая их в кулачковом патроне станка.

Револьверные станки с многогранной револьверной головкой дополнительно оснащены одним или двумя (передним и задним) поперечными суппортами. Все инструменты, работающие с продольным движением подачи, закрепляются в револьверной головке. Все инструменты, работающие с поперечным движением подачи, закрепляются в суппортах. Станки с круглой револьверной головкой поперечных суппортов не имеют. При необходимости поперечное движение подачи осуществляется медленным вращением револьверной головки вокруг горизонтальной оси. На рис. 6.16 показан патронный револьверный станок с многогранной головкой, состоящий из станины 1, передней бабки 3 с коробкой скоростей, коробки подач 2, размещенной на лицевой стороне станины, поперечного суппорта 5, револьверного суппорта 7 с револьверной головкой 6, барабанов передних 4 и задних 8 упоров. Повышение производительности обработки достигается за счет параллельной работы суппортов и предварительной настройки станка по упорам барабанов 4 и 8. Настройка станка по упорам позволяет автоматически выдерживать значения диаметров и длины обрабатываемых поверхностей заготовок.

Обработка ступенчатых валов ведется на многорезцовых токарных полуавтоматах, автоматах или **токарных гидрокопировальных автоматах** (рис. 6.17). Станок состоит из станины 1, передней бабки 2 с коробкой скоростей и шпинделем 3, верхней 4 и нижней 8 траверс; задний конец заготовки поддерживается центром, установленном в пиноли 6, по траверсам перемещаются верхний 5 и нижний 7 суппорты. Верхний суппорт имеет только поперечное движение подачи, нижний — только продольное (в ги-

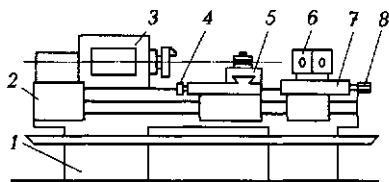


Рис. 6.16. Патронный токарно-револьверный полуавтомат:

1 — станина; 2 — коробка подач; 3 — передняя бабка; 4 — барабан передних упоров; 5 — поперечный суппорт; 6 — револьверная головка; 7 — револьверный суппорт; 8 — барабан задних упоров

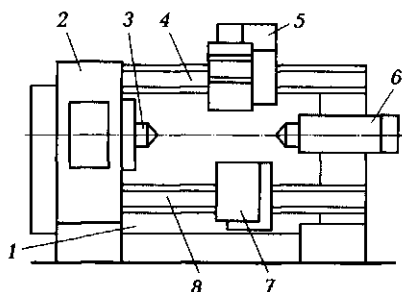


Рис. 6.17. Токарный гидрокопировальный автомат:

1 — станина; 2 — передняя бабка; 3 — шпиндель; 4 — верхняя траверса; 5 — верхний суппорт; 6 — пиволь; 7 — нижний суппорт; 8 — нижняя траверса

дрокпировальных автоматах суппорт перемещается по копиру, что позволяет обрабатывать сложные ступенчатые или фасонные поверхности).

Обработка массивных цилиндрических заготовок с отношением высоты к диаметру 0,3...0,4 ведется на **токарно-карусельных станках** (рис. 6.18). Станок состоит из станины 1, двух вертикальных стоек 8, соединенных поперечиной 7, на станине установлена карусель 2 с кулачковым патроном, по направляющим стоек перемещается траверса 9. По направляющим траверсы перемещаются верхний суппорт 5 с коробкой подач 4 и револьверный суппорт 6 с

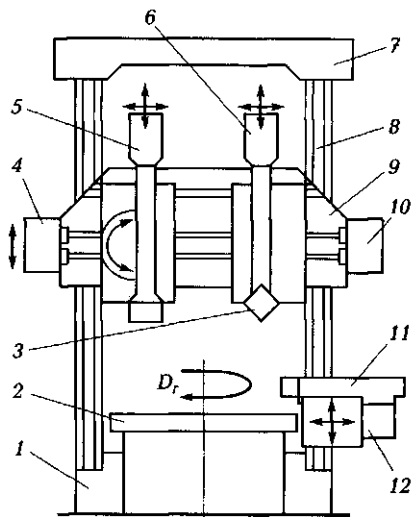


Рис. 6.18. Токарно-карусельный полуавтомат:

1 — станина; 2 — карусель; 3 — револьверная головка; 4, 10 и 12 — коробки подач; 5 — верхний суппорт; 6 — револьверный суппорт; 7 — поперечина; 8 — стойка; 9 — траверса; 11 — боковой суппорт; D_r — движение резания

коробкой подач 10. На revolverном суппорте установлена revolverная головка 3. На правой стойке установлен боковой суппорт 11 с коробкой подач 12.

При необходимости обработки большой партии несложных валков применяются многошпиндельные токарные автоматы параллельной обработки. Если в качестве заготовки используется пруток — применяют прутковые автоматы, если штучная заготовка — магазинные. В последних заготовки укладываются в специальных емкостях — «магазинах-накопителях». На рис. 6.19, а показан **четырёхшпиндельный прутковый автомат параллельного действия**. На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 5 стойки, которые соединены траверсой 4. На торце передней стойки установлен шпиндельный блок 3 с четырьмя шпинделями. На торце задней стойки установлены упоры 6. Количество упоров равно числу шпинделей. Автомат одновременно обрабатывает четыре одинаковые заготовки. Ведется обработка только наружных поверхностей заготовок с поперечным движением подачи суппортов. Прутки базируются и зажимаются в цанговых патронах. Величина вылета прутков ограничивается упорами задней стойки.

Партию детали со сложной конфигурацией наружной и внутренней поверхности можно обработать на **многошпиндельных автоматах последовательного действия**. На рис. 6.19, б показан многошпиндельный горизонтальный автомат последовательного действия. На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 9

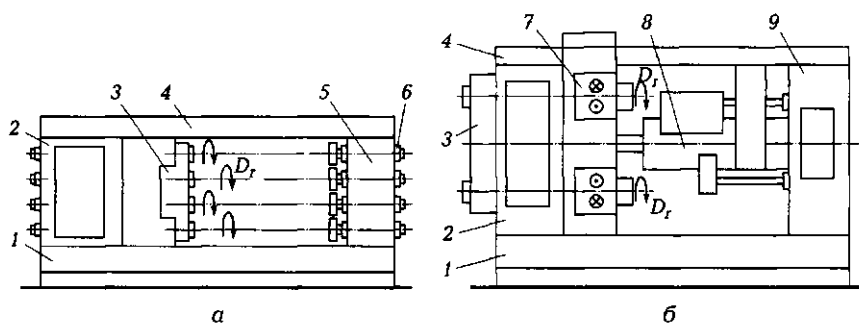


Рис. 6.19. Горизонтальные токарные автоматы:

а — четырёхшпиндельный параллельного действия; б — многошпиндельный последовательного действия; 1 — станина; 2 — передняя стойка; 3 — шпиндельный блок; 4 — траверса; 5 и 9 — задние стойки; 6 — упоры; 7 — поперечный суппорт; 8 — осевой суппорт; D_r — движение резания

стойки, соединенные траверсой 4. На передней стойке размещен шпиндельный блок 3. Шпиндельный блок имеет возможность дискретного поворота вокруг собственной оси. Напротив каждого шпинделя установлены поперечные суппорты 7. Между стойками установлен осевой суппорт 8 с каретками, расположенными соосно со шпинделями. Режущие инструменты, работающие с поперечным движением подачи (прорезные, подрезные, фасонные резцы), устанавливаются в зажимных устройствах поперечного суппорта. Режущие инструменты, работающие с продольным движением подачи (осевой инструмент, расточные, проходные резцы), устанавливаются в зажимных устройствах кареток. При каждом повороте шпиндельного блока зажатый в шпинделе пруток занимает очередную рабочую позицию. На каждой позиции производится частичная обработка поверхностей заготовки. Переходя от первой до последней рабочей позиции, заготовка подвергается полной обработке. Таким образом, на рабочих позициях станка обрабатывается несколько заготовок.

Аналогичный принцип, но для обработки дисков с отношением высоты к диаметру $0,3 \dots 0,4$ применен в **вертикальных многошпиндельных полуавтоматах** (рис. 6.20, а). На станине 1 установлены центральная колонна 5 и карусель 3 (с возможностью дискретного или непрерывного поворота вокруг оси колонны). При непрерывном вращении карусели колонна также синхронно вращается. На карусели установлены шпиндели 2 с кулачковыми

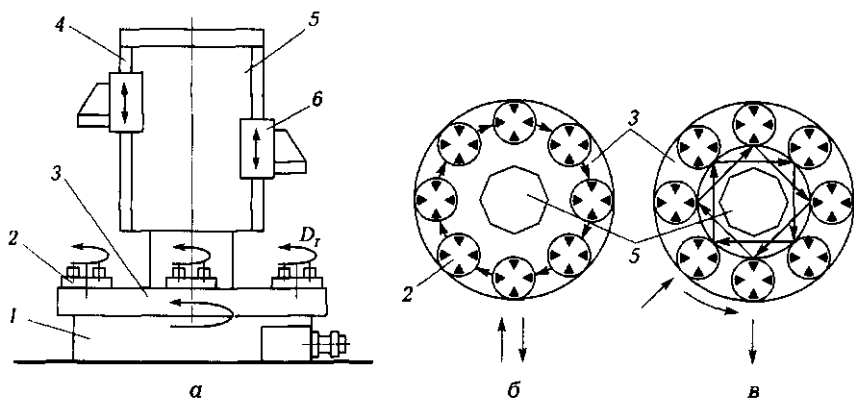


Рис. 6.20. Вертикальный многошпиндельный полуавтомат:

а — компоновка станка; б — одинарная индексация карусели; в — двойная индексация карусели; 1 — станина; 2 — шпиндель; 3 — карусель; 4 — вертикальные направляющие; 5 — центральная колонна; 6 — суппорты; D_r — движение резания

патронами. По вертикальным направляющим 4 колонны перемещаются суппорты 6. При дискретном вращении карусели возможны два исполнения станка: с одинарной индексацией карусели (рис. 6.20, б) и с двойной (рис. 6.20, в). На станках с одинарной индексацией проводится односторонняя обработка заготовки. На первой позиции проводится загрузка заготовки, далее после каждого поворота карусели обрабатывается группа поверхностей, затем обработанная деталь возвращается на первую позицию, где снимается со станка. Таким образом, на одном станке одновременно обрабатывается семь заготовок. На станках с двойной индексацией карусель поворачивается на двойной угловой шаг. Первая позиция загрузочная. Далее на нечетных позициях ведется обработка заготовки с одной стороны. Полуобработанная заготовка возвращается на первую позицию, где вручную или с помощью автооператора заготовка переносится на вторую загрузочную позицию и базируется по обработанным поверхностям. На четных позициях заготовка обрабатывается с другой стороны и снимается со станка. Таким образом, на станке ведется полная обработка заготовок с двух сторон.

6.4. СТРОГАНИЕ И ДОЛБЛЕНИЕ

Строгание — лезвийная обработка резанием открытых поверхностей, имеющих прямолинейную или винтовую образующую; главное движение, прямолинейное возвратно-поступательное, придается инструменту в горизонтальной плоскости, движение подачи, поступательное дискретное, придается заготовке в направлении, перпендикулярном вектору главного движения. Разновидностью строгания является долбление на долбежных станках. При долблении главное движение придается режущему инструменту в вертикальной плоскости.

6.4.1. Характеристика методов строгания и долбления

Процесс резания при строгании или долблении — прерывистый, и удаление материала происходит только при прямом (рабочем) ходе инструмента. При обратном (холостом) ходе резец не снимает стружку, но происходит охлаждение инструмента, что позволяет не применять СОТЖ.

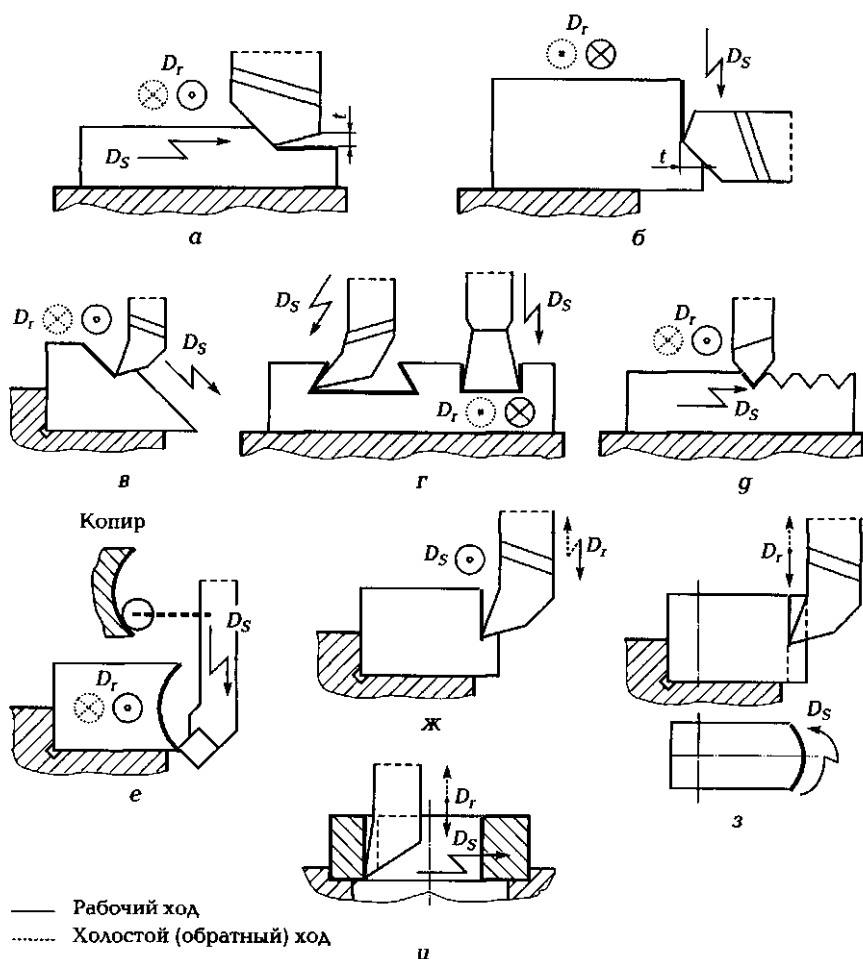


Рис. 6.21. Виды строгальных и долбежных работ:

а—в — строгание плоских, горизонтальных и наклонных поверхностей соответственно; г, д — строгание пазов и рифлений; е — строгание фасонной поверхности по копиру; ж — долбление плоской поверхности; з — долбление фасонной поверхности с круговой подачей; и — долбление шпоночного паза; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

Прерывистый процесс резания определяет высокие динамические нагрузки на технологическую систему СПИД, ударное врезание инструмента в материал заготовки. Поэтому при строгании не работают на высоких скоростях резания и применяют массивные быстрорежущие инструменты. Наличие холостых ходов

определяет низкую производительность обработки. Движение подачи при строгании и долблении прерывистое и осуществляется в конце холостого хода. При нормировании процесса задают скорости движения подачи: минутную S_m и на один двойной ход ползуна станка S_{2x} .

На строгальных станках обрабатывают плоские (горизонтальные, вертикальные и наклонные) поверхности, уступы, пазы (призматические, Т-образные, V-образные, типа «ласточкин хвост» и др.), рифления, фасонные линейные поверхности (рис. 6.21, а—е). На долбежных станках обрабатывают плоские вертикальные поверхности, шпоночные пазы, многогранники, некруглые отверстия, наружные пазы, фасонные поверхности (рис. 6.21, ж—и), в частности наружные и внутренние зубчатые венцы.

6.4.2. Строгальные и долбежные резцы и рабочие приспособления

При работе на строгальном станке на резец действует горизонтальная составляющая силы резания. Если на станок установить прямой резец (рис. 6.22, а), то под воздействием силы F он будет изгибаться по дуге радиуса r и врезаться в обработанную поверхность (заштрихованный участок). Поэтому при строгании применяются изогнутые резцы (рис. 6.22, б). В данном случае резец, изгибаясь, отодвигается от обработанной поверхности, что приводит к увеличению получаемого размера (это можно учесть при настройке станка).

Строгальные резцы, в зависимости от назначения, подразделяются на проходные, отрезные, фасонные и подрезные. Они выполняются правыми или левыми, черновыми или чистовыми. Дол-

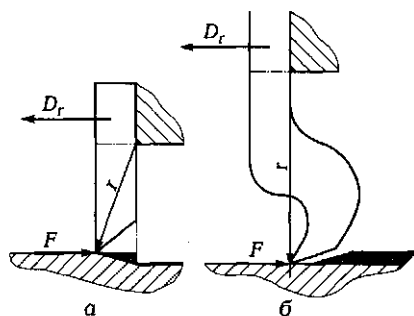


Рис. 6.22. Строгальный резец:

а — изгиб токарного резца; б — изгиб строгального резца; D_r — движение резания; F — сила резания; r — радиус изгиба резца

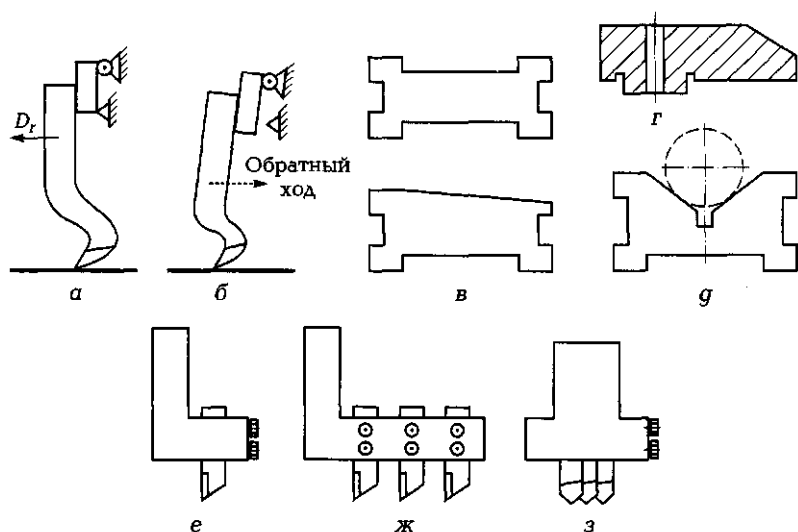


Рис. 6.23. Рабочие приспособления для строгальных и долбежных станков:

а, б — установка резца на жесткой и качающейся плите соответственно; *в* — прихваты; *г* — прижимы; *е, ж, з* — державки; D_r — движение резания

бежные резцы обычно изготавливают с напайной пластинкой из быстрорежущих сталей. Они бывают четырех типов: проходные, прорезные, для шпоночных пазов и специальные (долбяки).

Как видно из рис. 6.23, *а*, при холостом ходе резца возможно касание задней поверхности инструмента об обработанную поверхность заготовки. Поэтому резцедержатель устанавливают на качающейся плите (рис. 6.23, *б*) или в начале обратного хода резец отодвигают на 0,1 ... 0,5 мм от обработанной поверхности, так называемый отскок.

Обрабатываемые заготовки небольших размеров и простых форм устанавливают на станке в тисках. Крупные заготовки и заготовки сложных форм устанавливаются непосредственно на столе, имеющем Т-образные пазы, и закрепляются прихватами, призматическими или клиновыми (рис. 6.23, *в*), подкладками, упорами-прижимами (рис. 6.23, *г*). Заготовки с цилиндрическими базирующими элементами устанавливаются на призмы (рис. 6.23, *г*). Режущий инструмент закрепляется в резцедержателе, однопозиционных (рис. 6.23, *е*) или многопозиционных (рис. 6.23, *ж, з*) державках. В державках, показанных на рис. 6.23, *ж*, режущий инструмент устанавливается с превышением высоты последующего рез-

ца над предыдущим, что позволяет за один проход обработать заготовку на значительную глубину, т. е. использовать принцип деления припуска на части. Державки, показанные на рис. 6.23, з, позволяют вести параллельную обработку заготовки.

6.4.3. Строгальные и долбежные станки

Поперечно-строгальные станки (рис. 6.24, а) применяются в единичном и серийном производстве и во вспомогательных цехах машиностроительных заводов. На них обрабатываются заготовки с длиной обработки не более 1 000 мм. На фундаментной плите 6 установлена станина 7.

По вертикальным направляющим станины перемещается траверса 5 с горизонтальными направляющими, на которых консольно установлен стол 1. На столе устанавливается заготовка или рабочие приспособления. Вертикальные перемещения стола осу-

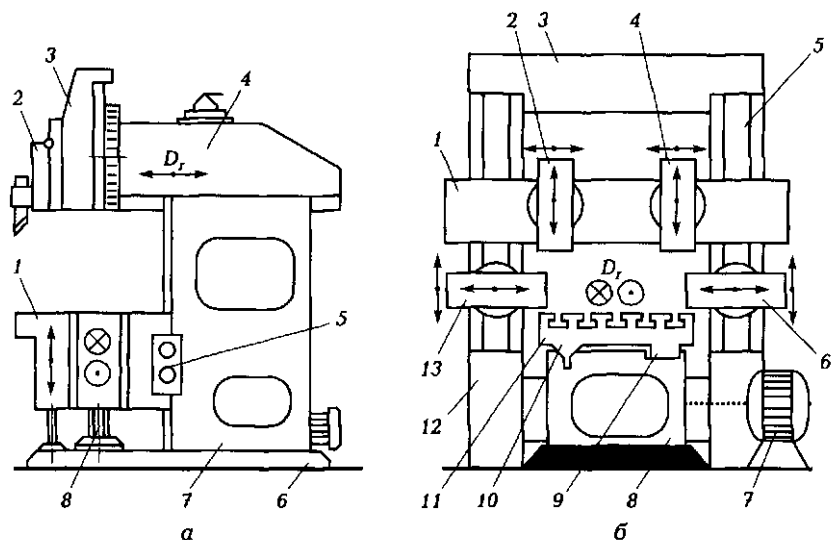
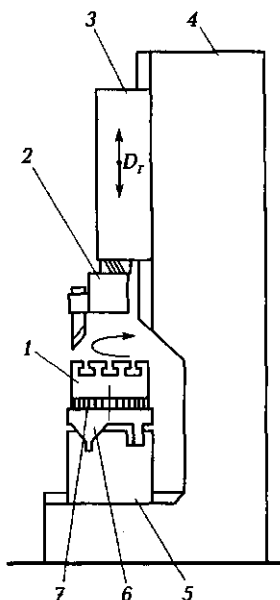


Рис. 6.24. Строгальные станки:

а — поперечно-строгальный: 1 — стол; 2 — качающаяся плита; 3 — суппорт; 4 — ползун; 5 — траверса; 6 — фундаментная плита; 7 — станина; 8 — домкрат; б — продольно-строгальный: 1 — траверса; 2 и 4 — вертикальные суппорты; 3 — поперечина; 5 и 12 — стойки; 6 и 13 — боковые суппорты; 7 — главный электродвигатель; 8 — станина; 9 и 10 — направляющие; 11 — стол; D_r — движение резания

Рис. 6.25. Долбежный станок:

1 — стол; 2 — суппорт; 3 — ползун; 4 — станина;
5 — поперечные салазки; 6 — продольные салазки;
7 — поворотные салазки; D_r — движение резания



ществляются домкратом 8. На верхнем торце станины выполнены горизонтальные направляющие, по ним перемещается ползун 4. На переднем торце ползуна выполнены вертикальные направляющие, по которым перемещается вертикальный суппорт 2 с качающейся плитой 1 и резцедержателем. Вертикальный суппорт можно поворачивать вокруг горизонтальной оси для строгания наклонных плоскостей.

На **продольно-строгальных станках** обрабатывают крупные, тяжелые заготовки. Ход стола у этих станков 1,5...12 м, ширина строгания 0,7...4 м. Продольно-строгальные станки подразделяются на одно- и двухстоечные. Двухстоечный станок показан на рис. 6.24, б. Основанием станка служит станина 8, вдоль которой расположены направляющие (правая 9 — плоская, левая 10 — V-образная). По направляющим перемещается стол 11, на котором устанавливают заготовки. Стол приводится в движение от собственного электродвигателя постоянного тока 7, что позволяет бесступенчато регулировать скорости прямого и обратного хода. Портал станка состоит из левой 12 и правой 5 стоек, соединенных сверху поперечиной 3. По вертикальным направляющим стоек перемещается траверса 1 и каретки боковых суппортов: правого 6 и левого 13. На траверсе размещены левый 2 и правый 4 вертикальные суппорты. Каждый суппорт снабжен собственной коробкой подач, может перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях и быть повернут в вертикальной плоскости на угол до 60°.

Долбежные станки (рис. 6.25) характеризуются тем, что главное движение резания осуществляется в вертикальной плоскости. Основанием станка служит станина 4, на горизонтальных направляющих которой установлены поперечные 5, продольные 6 и поворотные 7 салазки с рабочим столом 1. По вертикальным направляющим станины перемещается ползун 3 с суппортом 2 и резцедержателем.

6.5.1. Характеристика метода протягивания

Протягивание — лезвийная обработка резанием открытых поверхностей; главное движение, прямолинейное возвратно-поступательное, придается режущему инструменту (протяжке или прошивке). Движение подачи заложено в конструкции режущего инструмента в виде так называемого подъема на зуб.

Подъем на зуб — превышение по высоте или ширине размера режущей части зуба по отношению к предыдущему зубу.

По характеру движения режущего инструмента различают **протяжки** (инструмент вытягивается из отверстия) и **прошивки** (инструмент проталкивается в отверстие).

Протягивание — высокопроизводительный процесс обработки наружных и внутренних поверхностей, обеспечивающий высокую точность формы и размеров обработанной поверхности. При протягивании профиль обработанной поверхности копируется профилем режущих зубьев, поэтому протяжки — узкоспециальный инструмент, применяемый для обработки поверхностей со строго заданными формой и размерами.

По характеру обработанной поверхности различают внутренние и наружные протяжки.

Внутренние протяжки предназначены для обработки круглых, квадратных, многогранных и шлицевых отверстий, а также шпоночных и других фигурных пазов. Промышленностью выпускаются стандартные внутренние протяжки: *круглые переменного резания* диаметром от 10 до 90 мм, обрабатываются отверстия по 7—9-му квалитетам, $Ra\ 0,63 \dots 2,5$ мкм; *для протяжки квадратных отверстий* со стороной квадрата 10...60 мм, обрабатываются отверстия по 11—12-му квалитетам, $Ra < 20$ мкм; *шлицевые, для отверстий с прямобочным профилем*, с центрированием по наружному диаметру 20...88 мм, комбинированные, переменного резания, для обработки шлицов с числом шлицов 6, 8, 10; *шлицевые, для отверстий с прямобочным профилем*, с центрированием по внутреннему диаметру 20...88 мм, комбинированные, переменного резания, для обработки шлицов с числом шлицов 6, 8, 10; *для шлицевых отверстий с эвольвентным профилем*, с центрированием по наружному диаметру 12...90 мм, модулем 1...5 мм.

Наружные протяжки предназначены для обработки наружных поверхностей, пазов, уступов. Эти протяжки являются специальным видом инструмента, поэтому не стандартизованы. Протягивание применяется вместо строгания, фрезерования, шлифования. При наружном протягивании за одну операцию обрабатывают как можно больше сопряженных поверхностей, для чего протяжки соединяют в блоки.

6.5.2. Элементы и геометрия режущей части протяжек

Круглая протяжка (рис. 6.26) разбита на следующие элементы. Замковая часть 1 (хвостовик) служит для закрепления протяжки в патроне тягового устройства станка. Шейка 2 — соединительная поверхность. Направляющий конус 3 и передняя направляющая часть 4 служат для центрирования заготовки в начале резания. Режущая часть 5 служит для срезания основной доли припуска и состоит из режущих зубьев, высота или ширина которых увеличи-

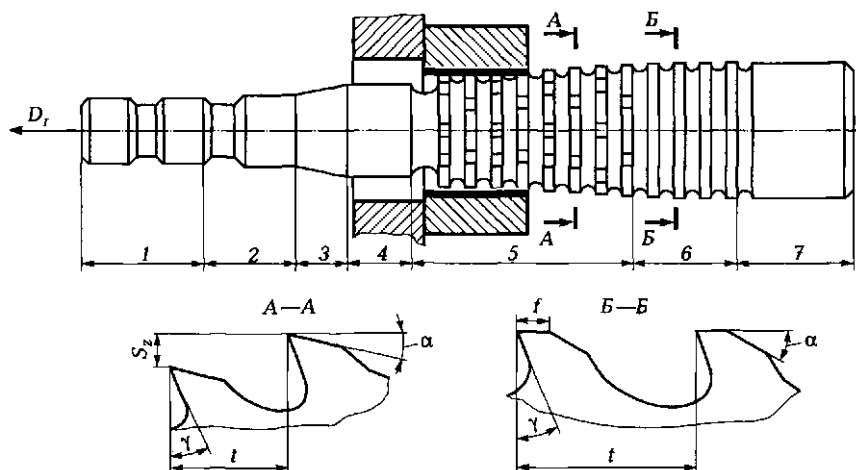


Рис. 6.26. Круглая протяжка:

1 — замковая часть; 2 — шейка; 3 — направляющий конус; 4 и 7 — передняя и задняя направляющие части соответственно; 5 — режущая часть (режущие зубья); 6 — калибрующая часть (калибрующие или чистовые зубья); D_r — движение резания; S_z — подъем на зуб; f — ленточка; t — шаг между зубьями; α , γ — главные задний и передний углы соответственно

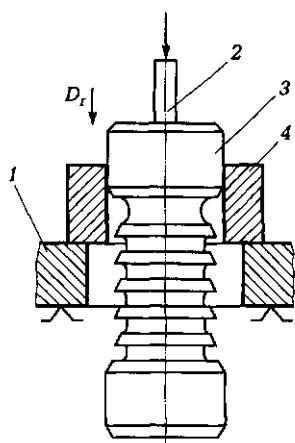


Рис. 6.27. Прошивание:

1 — стол; 2 — поршень; 3 — прошивка; 4 — заготовка; D_r — движение резания

ваются на высоту срезаемого слоя. Для облегчения образования стружки на режущих зубьях в шахматном порядке выполняются стружколомные канавки. Калибрующая часть 6 предназначена для придания обработанной поверхности окончательной формы, необходимой точности и шероховатости. Она состоит из калибрующих зубьев, форма и размеры которых соответствуют форме и размерам обработанной поверхности. Задняя направляющая часть 7 необходима для поддержки протяжки при выходе ее из обработанного отверстия.

Прошивка 3 (рис. 6.27) проталкивается в отверстие заготовки 4 поршнем 2 прессы. Заготовка устанавливается на стол 1 прессы. Так как прошивка работает на сжатие, ее длина ограничена (длина прошивки должна быть не более 15 ее диаметров). Поэтому прошивки обычно применяются для полуступенчатой правки цилиндрических отверстий.

Черновые и чистовые зубья протяжек имеют различную геометрию. **Черновые зубья** (см. рис. 6.26, сечение А—А) выполняются острозаточенными. Задний угол α для внутренних протяжек равен 3° , для наружных протяжек — $3 \dots 8^\circ$. Передний угол γ выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала и принимается в пределах $10 \dots 20^\circ$. Шаг между зубьями t выбирается из требования одновременности работы не менее трех зубьев. Подъем на зуб S_z принимается $0,06 \dots 0,3$ мм/зуб.

Чистовые зубья (см. рис. 6.26, сечение Б—Б) выполняются с ленточкой f , равной $0,02 \dots 0,3$ мм. Задний угол α для внутренних протяжек равен 1° , для наружных — $1 \dots 2^\circ$. Передний угол γ выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала и принимается $0 \dots 15^\circ$. Нулевой передний угол обычно назначается для профильных протяжек, что позволяет не потерять геометрическую точность зубьев при перегочках. Шаг между зубьями t выбирается из требования участия в работе только одного зуба. Подъем на зуб S_z выбирается $0,015 \dots 0,03$ мм/зуб.

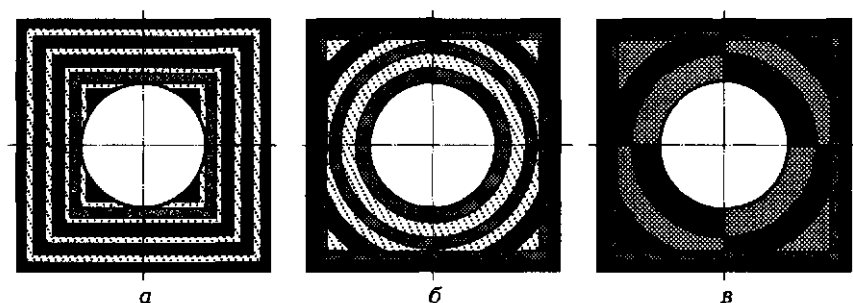


Рис. 6.28. Схемы срезания припуска:

а — профильная; *б* — генераторная; *в* — групповая

При протягивании фасонных внутренних поверхностей в заготовке сверлится цилиндрическое отверстие. Затем производится протягивание до получения необходимого профиля. При этом применяются несколько схем срезания припуска, а следовательно, и профилирования зубьев протяжки.

При **профильной схеме** (рис. 6.28, *а*) черновые и чистовые зубья профилируются по кривой эквидистантной (*равноудаленной*) обработанной поверхности. Эта схема обеспечивает высокую геометрическую точность обработанной поверхности, очень простое профилирование и переточку зубьев. Но от зуба к зубу возрастает длина режущей кромки — это приводит к необходимости уменьшать подъем на зуб. Протяжки получаются настолько длинными, что приходится обработку разбивать на несколько этапов.

При **генераторной схеме** (рис. 6.28, *б*) черновые зубья профилируются дугами окружности или сочетанием «дуга окружности — кривая, эквидистантная профилю», т. е. обрабатываемый профиль генерируется зубом протяжки. От зуба к зубу длина режущей кромки возрастает не так сильно, как при профильной схеме, следовательно, можно назначать большие подачи на зуб и таким образом уменьшить длину протяжки.

При **групповой схеме** (рис. 6.28, *в*) черновой припуск разбивается на секторы, каждый из которых обрабатывает своя группа черновых зубьев, спрофилированных по генераторной схеме. От зуба к зубу длина режущей кромки возрастает не так сильно, как при генераторной схеме, следовательно, можно назначать большие подачи на зуб и таким образом уменьшить длину протяжки. При использовании генераторной или групповой схем резко усложняется заточка и профилирование зубьев, поэтому на чистовых зубьях протяжек всегда используется профильная схема.

6.5.3. Особенности процесса протягивания

Каждый зуб протяжки работает как строгальный резец. Малая высота зубьев и высокая жесткость протяжки в диаметральной плоскости позволяют назначать достаточно высокие режимы резания. Учитывая, что за один рабочий ход генерируется весь профиль обработанной поверхности, протягивание является высокопроизводительным процессом, однако имеет особенности, которые необходимо учитывать при выборе протяжек и схемы обработки.

При резании стружка, снимаемая каждым зубом, должна разместиться во впадине между зубьями. Если объем срезаемой стружки с учетом ее усадки будет больше объема впадины между зубьями, протяжку заклинит и произойдет поломка инструмента.

Для выбора станка необходимо знать осевую силу резания P_z , для расчета прочности инструмента используют удельную силу резания — силу резания на единицу длины режущей кромки. Осовая сила резания равна:

■ для круглых протяжек $P_z = C_p S_z^x D z K_1 K_2 K_3 K_4$;

■ для шпоночных и шлицевых протяжек $P_z = C_p S_z^x n z K_1 K_2 K_3 K_4$,

где S_z — подъем на зуб, мм; x — показатель степени; D — диаметр обработанного отверстия, мм; C_p — коэффициент, характеризующий материал заготовки и условия обработки; n — число шлицов; z — число одновременно работающих зубьев; $K_1—K_4$ — коэффициенты, учитывающие соответственно влияние переднего и заднего углов, износа инструмента, наличие и вид СОТС.

Протягивание с прямолинейным движением резания — процесс прерывистый. Необходимо возвратно-поступательное движение исполнительного механизма главного движения. Прямой ход — рабочее движение, обратный ход — холостой. Инерция масс исполнительного механизма главного движения не позволяет работать на высоких скоростях резания, обычно скорость резания принимают 8...15 м/мин.

6.5.4. Обработка заготовок на протяжных станках

Протяжками или прошивками обрабатывают **цилиндрические отверстия** после сверления, растачивания, зенкерования, а также отверстия, полученные на стадии заготовительных операций.

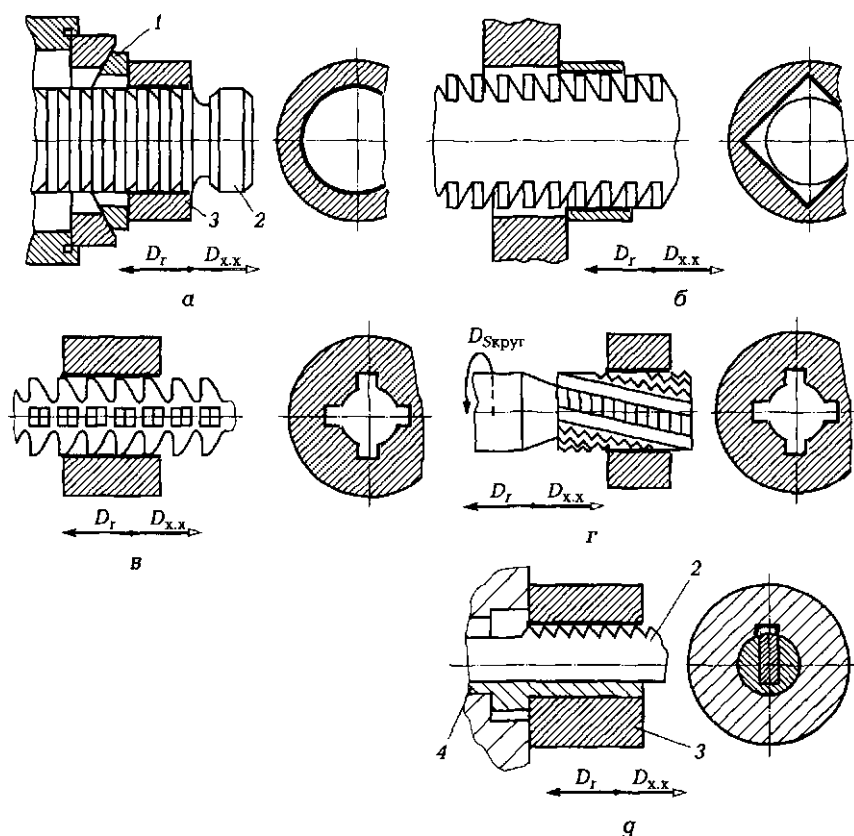


Рис. 6.29. Схемы протягивания отверстий:

а — на сферической опоре; *б* — многогранных; *в* — прямых шлицевых; *г* — винтовых шлицевых; *г* — шпоночных пазов; 1 — сферическая опора; 2 — протяжка; 3 — заготовка; 4 — направляющая втулка; D_r — движение резания; $D_{x,x}$ — обратный ход; $D_{скрут}$ — движение круговой подачи

При обработке заготовки цилиндрической протяжкой 2 (рис. 6.29, *а*) заготовку 3 устанавливают на сферическую опору 1 (так называемая плавающая протяжка) или на плоскую. При установке на сферическую опору заготовка самоустанавливается по оси протяжки, но торец может получиться неперпендикулярным оси отверстия. Такую установку применяют, если торец заготовки обрабатывается после протягивания. При установке на плоскую опору торец перпендикулярен оси отверстия, но возможна поломка протяжки из-за разницы припусков в диаметральной плоскости протяжки.

Многогранные отверстия протягивают многогранными протяжками (рис. 6.29, б). В заготовке сверлят круглое отверстие. В зависимости от величины припуска на обработку применяют ту или иную схему срезания припуска.

Шлицевые отверстия получают шлицевыми протяжками. Нарезание прямых шлицов ведут при прямолинейном главном движении (рис. 6.29, в), при нарезании винтовых шлицов (рис. 6.29, г) протяжке придают дополнительное движение $D_{\text{скрут}}$ для получения винтового движения резания. **Шпоночные** или иные **пазы** протягивают шпоночными протяжками (рис. 6.29, г). Профиль поперечного сечения зуба должен соответствовать профилю поперечного сечения паза, при этом заготовку устанавливают на плоскую опору. Для направления протяжки 2 применяют направляющую втулку 4.

6.5.5. Протяжные станки

Протяжные станки отличаются простотой конструкции и большой жесткостью. Это объясняется тем, что в станках отсутствует цепь движения подачи. Основными характеристиками протяжного станка являются тяговое усилие на штоке и ход штока рабочего цилиндра.

Горизонтально-протяжной станок (рис. 6.30) — станок для протягивания внутренних поверхностей. На станине 1 расположен гидроцилиндр 3 и насосная станция 2. На переднем конце штока 4 установлен захват 5 с кареткой 7. Каретка перемещается по направляющим станины. Протяжка устанавливается в захвате и протаскивается сквозь отверстие в заготовке, которая опирается торцом на опорную поверхность кронштейна 6. Поступательное движение протяжке сообщается до тех пор, пока она не выйдет из отверстия в заготовке. Заготовка падает в поддон 8. Протяжка возвращается в исходное положение, и процесс повторяется.

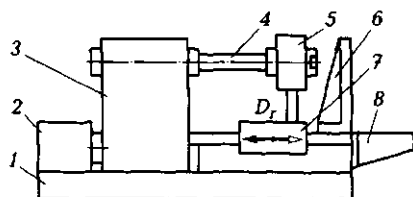


Рис. 6.30. Горизонтально-протяжной станок:

1 — станина; 2 — насосная станция; 3 — гидроцилиндр; 4 — шток; 5 — захват; 6 — кронштейн; 7 — каретка; 8 — поддон; D_r — движение резания

Сверление — лезвийная обработка резанием отверстий осевым инструментом; главное движение, вращательное и движение подачи, прямолинейное придают инструменту.

6.6.1. Схемы обработки поверхностей на станках сверлильной группы

На сверлильных станках производят сверление, рассверливание, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, обработку ступенчатых отверстий и нарезание внутренних резьб.

Сверлением (рис. 6.31, а) получают сквозные и глухие отверстия.

Рассверливанием (рис. 6.31, б) увеличивают диаметр ранее просверленного отверстия.

Зенкерованием (рис. 6.31, в) также увеличивают диаметр отверстия, но, по сравнению с рассверливанием, зенкерование позволяет получить большую точность и производительность обработки. Зенкерованием можно обрабатывать отверстия, полученные в заготовке литьем или давлением.

Развертывание (рис. 6.31, г) — чистовая операция, обеспечивающая высокую точность отверстия. Развертыванием обрабатывают цилиндрические и конические отверстия после зенкерования или растачивания.

Зенкованием обрабатывают цилиндрические (рис. 6.31, г) и конические (рис. 6.31, е) углубления под головки болтов и винтов. Для обеспечения перпендикулярности и соосности обработанной поверхности основному отверстию режущий инструмент (зенковку) снабжают направляющим цилиндром.

Цекованием (рис. 6.31, ж, з) обрабатывают торцевые опорные плоскости для головок болтов, винтов и гаек. Перпендикулярность обработанной торцевой поверхности основному отверстию обеспечивает направляющий цилиндр режущего инструмента (цековка).

Центровочным сверлом (рис. 6.31, и) обрабатывают центровые базовые отверстия в валах. *Внутреннюю резьбу* обрабатывают метчиками (рис. 6.31, к). При этом скорость движения подачи должна быть равна шагу резьбы ($S_0 = h$). Сложные поверхности об-

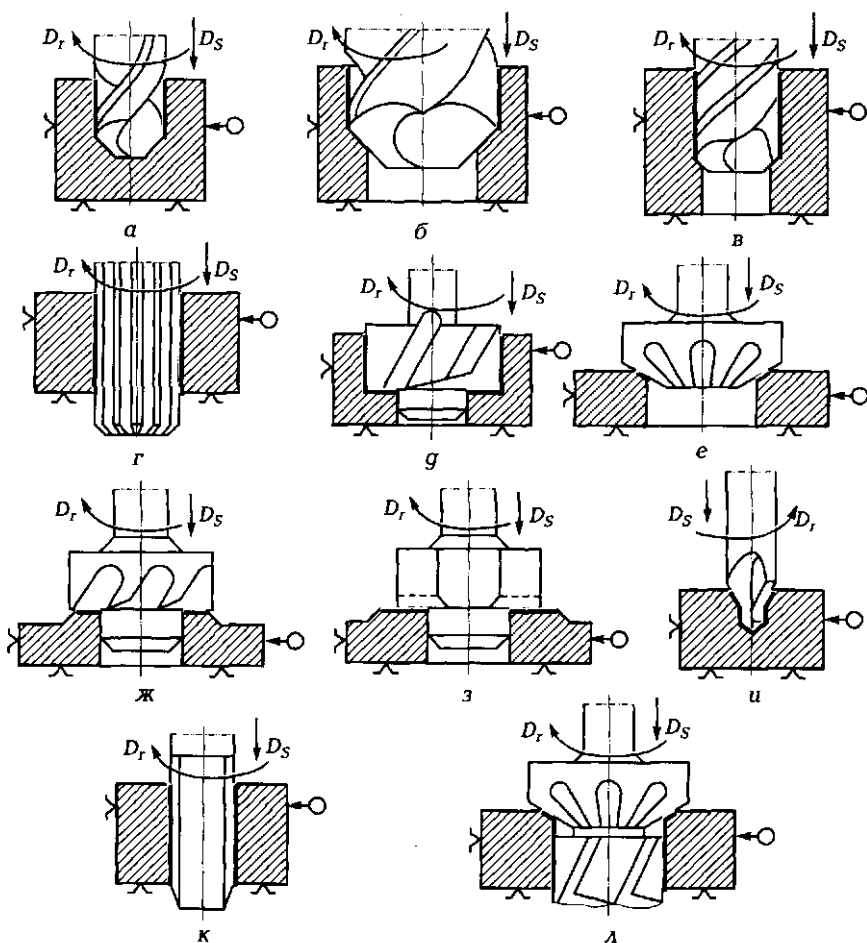


Рис. 6.31. Схемы обработки поверхностей на сверлильных станках:

а — сверление; б — рассверливание; в — зенкерование; г — развертывание; г, е — зенкование; ж, з — цекование; и — обработка центровочным сверлом; к — нарезание резьбы; л — обработка сложных отверстий; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

работывают **комбинированным инструментом** (рис. 6.31, л). Точные конические отверстия последовательно обрабатывают сверлением, зенкерованием ступенчатый коническим зенкером, развертыванием конической разверткой со стружкоразделительными канавками, развертыванием гладкой конической разверткой.

6.6.2. Части, элементы и геометрия осевого инструмента

Сверла. Различают спиральные, перовые сверла, сверла для глубокого сверления (шнековые, кольцевые, ружейные, пушечные), центровочные и комбинированные (специальные) сверла.

Спиральное сверло (рис. 6.32, а) имеет рабочую часть 9 и хвостовик 7, который служит для закрепления сверла в рабочем приспособлении станка и выполняется цилиндрическим или коническим. Конический хвостовик снабжен лапкой 6, предохраняющей его при выбивании сверла из шпинделя станка. Рабочая часть сверла выполняется из инструментальной стали или с напаянными пластинами из твердого сплава. Она осуществляет про-

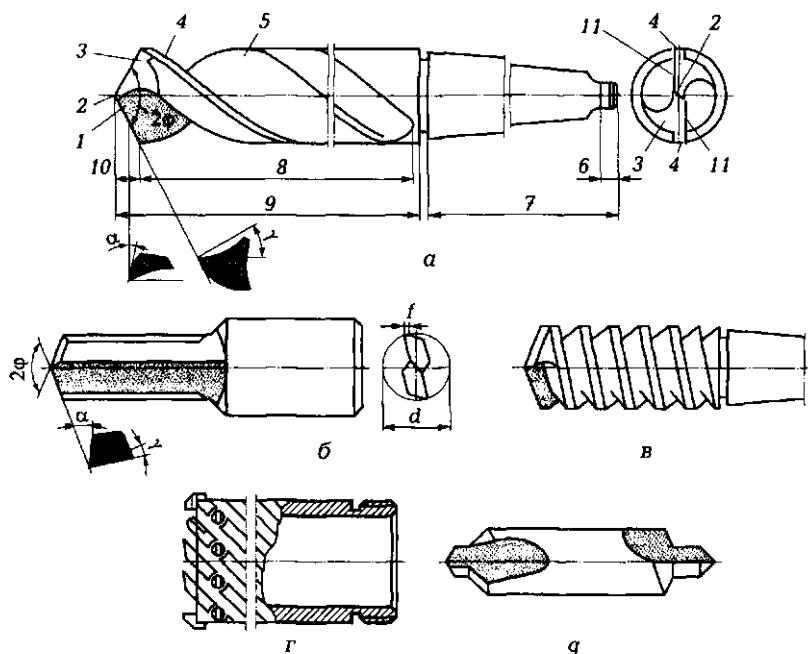


Рис. 6.32. Сверла:

а — спиральное сверло; б — перовое сверло: 1 — передняя поверхность; 2 — поперечная кромка; 3 — главная задняя поверхность; 4 — ленточка; 5 — винтовая канавка; 6 — лапка; 7 — хвостовик; 8 — направляющая часть; 9 — рабочая часть; 10 — режущая часть; 11 — главная режущая кромка; d — диаметр сверла; f — ленточка; α , γ , ϕ — углы резания; в — шнековое сверло; г — кольцевое сверло; д — центровочное сверло

цесс резания, формирует поверхность обрабатываемого отверстия, отводит стружку из зоны резания и направляет сверло при обработке. Рабочая часть 9 состоит из режущей 10 и направляющей 8 частей. Направляющая часть 8 имеет две винтовые канавки 5, необходимые для отвода стружки из зоны резания, и две ленточки 4, необходимые для направления сверла. Режущая часть 10 имеет две главные режущие кромки 11, образованные передними 1 и главными задними 3 поверхностями. Главные режущие кромки 11 соединяются под углом 2ϕ поперечной кромкой 2. От значения угла 2ϕ зависят толщина и ширина срезаемого слоя, соотношение между радиальной и осевой составляющих силы резания и температура в зоне резания. С увеличением угла 2ϕ возрастает осевая P_x и уменьшается радиальная P_y составляющие силы резания. Ширина срезаемого слоя при этом уменьшается, температура в зоне резания повышается.

С изменением угла 2ϕ изменяются значения углов α и γ и форма главных режущих кромок. Рекомендуемые значения угла 2ϕ приведены в табл. 6.7.

Передний угол γ измеряют в главной секущей плоскости, проходящей перпендикулярно главной режущей кромке. Задний угол α измеряют в плоскости, проходящей через точку главной режущей кромки параллельно оси сверла. Значения этих углов изменяются от центра сверла к его периферии. Проходя от периферии сверла к центру, угол γ уменьшается, а угол α увеличивается.

Таблица 6.7. Рекомендуемые значения угла 2ϕ

Обрабатываемый материал	$2\phi, \dots^\circ$
Сталь углеродистая конструкционная	116... 120
Коррозионно-стойкая сталь, высокопрочная сталь, жаропрочные сплавы	125... 130
Титановые сплавы	150
Чугун средней твердости, твердая бронза	90... 100
Чугун твердый	120... 125
Латунь, алюминиевые сплавы	130... 150
Медь	125
Пластмассы	80... 110
Бетон, мрамор	80... 90

Передний угол поперечной кромки отрицателен и равен примерно -60° , следовательно, поперечная кромка сминает и скоблит обрабатываемый материал, что резко повышает силу резания. Поэтому для уменьшения влияния поперечной кромки на процесс резания обработку отверстий большого диаметра рационально проводить в два этапа: сверление отверстия сверлом меньшего диаметра, затем рассверливание отверстия сверлом нужного диаметра.

Ленточка служит для центрирования сверла по обработанной поверхности отверстия и обеспечивает возможность многократной переточки сверла. Ширина ленточек промышленных сверл $0,2 \dots 3$ мм. По ленточке сверло имеет обратную конусность $0,03 \dots 0,12$ мм на 100 мм длины.

Наиболее напряженными участками сверла являются точки перехода главной режущей кромки в ленточку. В этих точках скорость резания и температура максимальны. Для улучшения теплоотвода, и соответственно, повышения стойкости сверла, применяют двухконусную заточку сверл диаметром более 10 мм. На периферии сверла формируют переходные режущие кромки под углом 2ϕ , равным $70 \dots 75^\circ$.

Перовые сверла (рис. 6.32, б) значительно проще и дешевле в изготовлении, чем спиральные, жесткость их несколько выше, и предназначены они для обработки сравнительно коротких отверстий. Рабочая часть сверла выполняется в виде тонкой пластины с двумя режущими кромками, расположенными под углом 2ϕ друг к другу (угол 2ϕ равен $116 \dots 118^\circ$). Передний угол γ у перовых сверл отрицательный и зависит от толщины пера: с увеличением толщины γ увеличивается. Задний угол α получают одноплоскостной подточкой задней поверхности. Обычно угол α равен $10 \dots 15^\circ$. Ширина ленточки f принимается равной $f = 0,1d$ при $d \leq 1$ мм; $f = (0,03 \dots 0,1)d$ при больших диаметрах, d — диаметр сверла.

Цельные перовые сверла из быстрорежущей стали применяются в приборостроении, для обработки отверстий диаметром до 14 мм в деталях из латуни, бронзы, пластмасс. Сборные перовые сверла, оснащенные пластинами из твердого сплава, применяются для обработки отверстий диаметром $20 \dots 130$ мм в деталях из конструкционных сталей и чугунов на сверлильных, фрезерных и расточных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Шнековые сверла (рис. 6.32, в) — сверла с большим углом наклона винтовых канавок (до 60°), что позволяет сверлить отверстия с отношением длины к диаметру до 30 за один проход без периодического вывода сверла из отверстия для удаления стружки.

Промышленные сверла имеют диаметр от 5 до 14 мм и выполняются с плоской заточкой передних и задних поверхностей. Для обработки чугуна и конструкционных сталей рекомендуются значения: $2\phi = 118^\circ$, $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 15^\circ$.

Для экономии работы, затрачиваемой на сверление, при больших диаметрах сверления и при сверлении глубоких отверстий применяются **кольцевые сверла** (рис. 6.32, г). При их работе в стружку превращается лишь кольцевая выборка, сердцевина металла остается нетронутой.

Центровочные сверла (рис. 6.32, г) позволяют одновременно обрабатывать цилиндрическую и коническую части центровочных отверстий. Промышленностью выпускаются сверла с углом базового конуса центрового отверстия $60, 75^\circ$, с двойным базовым конусом 60 и 120° , с радиусной базовой поверхностью. Режущая часть сверла образована двумя прямыми, наклонными или винтовыми канавками и состоит из цилиндрического и конического участков. Цилиндрический участок имеет те же части, что и спиральное сверло: две режущие кромки, расположенные под углом $2\phi = 118^\circ$, и поперечную кромку. Задние поверхности цилиндрической и конической частей имеют углы 11 и 6° соответственно. На цилиндрической части отсутствуют ленточки.

Зенкеры, зенковки и развертки. К ним относятся многолезвийные размерные осевые режущие инструменты, предназначенные для предварительной или окончательной обработки отверстий, полученных на предшествующих операциях. Общим конструктивным элементом этих режущих инструментов является рабочая часть 3 (рис. 6.33, а, е) и присоединительная часть. Присоединительная часть выполняется в виде цилиндрического или конического хвостовика (концевой инструмент) либо конического или цилиндрического отверстия с поперечной канавкой на торце (насадной инструмент).

По конструктивному исполнению и инструментальному материалу они подразделяются на цельные из быстрорежущей стали; оснащенные напаянными пластинами из твердого сплава; сборные с механическим креплением быстрорежущих или твердосплавных ножей; с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин.

С помощью **зенкеров** обрабатывают цилиндрические отверстия, полученные сверлением, отливкой, ковкой, штамповкой, с целью придания им более правильной геометрической формы, повышения размерной точности и уменьшения шероховатости поверхности. В зависимости от точности исполнения зенкеры под-

разделяются на № 1 и 2. Зенкеры № 1 предназначены для промежуточной обработки перед развертыванием. Зенкеры № 2 предназначены для окончательной обработки отверстий точностью по 8—10-му квалитетам (табл. 6.8).

Отечественной промышленностью выпускаются следующие типы зенкеров:

- зенкеры цельные с коническим хвостовиком, трехзубые, номинальный диаметр 10...50 мм, хвостовик — конус Морзе № 1—4;
- зенкеры, оснащенные пластинами из твердого сплава, с коническим хвостовиком, трехзубые, номинальный диаметр 14...50 мм, хвостовик — конус Морзе № 2—4;
- зенкеры цельные насадные быстрорежущие или оснащенные пластинами из твердого сплава, номинальный диаметр 42...80 мм, число зубьев — 4;
- зенкеры со вставными ножами из твердого сплава с коническим хвостовиком, номинальный диаметр 30...50 мм, хвостовик — конус Морзе № 4, число зубьев — 3—4;
- зенкеры насадные со вставными быстрорежущими ножами или вставными ножами из твердого сплава, номинальный диаметр 50...100 мм, число зубьев — 4—6.

Рабочая часть 3 зенкеров (см. рис. 6.33, а) характеризуется углом наклона стружечных канавок или ножей ω , передним γ и задним α углами, главным углом в плане φ и шириной ленточки f . Обычно зенкеры имеют правый наклон канавок, что обеспечивает хороший отвод стружки и положительный передний угол. Зенкеры для обработки глухих отверстий выполняются с режущей кромкой, перпендикулярной оси зенкера ($\varphi = 90^\circ$).

Таблица 6.8. Предельные отклонения диаметра стандартных зенкеров

Номинальный диаметр зенкера, мм	Зенкер № 1		Зенкер № 2	
	Отклонения диаметра, мкм			
	верхнее	нижнее	верхнее	нижнее
10 ... 18	-210	-245	+70	+45
18 ... 30	-245	-290	+85	+50
30 ... 50	-290	-450	+100	+50
50 ... 80	-450	-410	+120	+60
80 ... 100	-490	-490	+150	+70

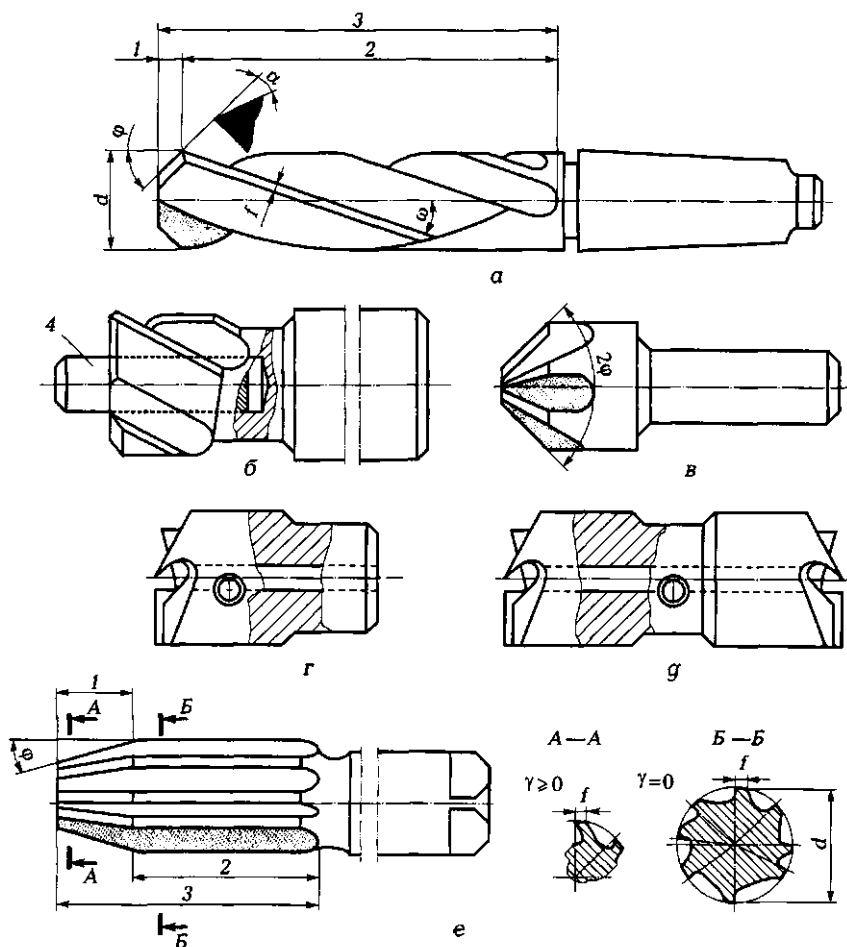


Рис. 6.33. Зенкеры, цековки, зенковки и развертки:

a — зенкер; b , $в$ — зенковки; $г$ — односторонняя обратная зенковка; $г$ — двусторонняя зенковка; e — развертка; l — режущая часть; 2 — калибрующая часть; 3 — рабочая часть; 4 — цапфа; d — истинный диаметр развертки; f — ширина ленточки; α , γ , ϕ , ω — углы резания

Рекомендации по выбору угла наклона стружечных канавок ω в зависимости от обрабатываемого материала приведены в табл. 6.9.

Главный угол в плане влияет на толщину и ширину срезаемого слоя и, как следствие, на составляющие усилия резания и условия теплоотвода от угловых точек зуба инструмента. При малых углах зенкер работает с малой толщиной срезаемого слоя, но с большой

Таблица 6.9. Угол наклона стружечных канавок зенкеров

Тип инструмента	ω, \dots°
Зенкеры из быстрорежущей стали:	
■ с коническим хвостовиком	20
■ насадные	15
Зенкеры, оснащенные пластинами из твердого сплава:	
■ наклон пластины	10
■ наклон канавок	15
Зенкеры со вставными ножами (наклон ножей)	10

шириной, что повышает стойкость инструмента. При $\varphi < 45^\circ$ повышение крутящего момента приводит к вибрациям зенкера, обычно выбирают $\varphi = 60^\circ$.

Передний угол γ , как правило, не указывается. Он получается за счет наклона винтовой канавки. При φ равном 60° и ω , равном 10; 15 и 20° , угол γ равен соответственно $11^\circ 20'$; 15 и 20° . У зенкеров, оснащенных твердым сплавом, передний угол получают заточкой передней поверхности параллельно главной режущей кромке. Задняя поверхность зенкеров плоская. При обработке стали и чугуна оптимальное значение угла α равно $6 \dots 10^\circ$.

Ленточка на калибрующей части 2 (см. рис. 6.33, а) зенкера шлифуется по цилиндру. Она служит для направления зенкера и обеспечивает получение требуемого размера отверстия. Ширина ленточки l принимается для быстрорежущих зенкеров 1...2 мм, для твердосплавных — 0,5...0,9 мм.

Для обработки деталей из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей применяют только зенкеры, оснащенные твердым сплавом марок ВК8, ВК60М, ВК100М. Особенностью этих зенкеров является заточка дополнительной переходной режущей кромки под углом φ до 15° и отрицательный передний угол ($-8 \dots -5^\circ$).

Для обработки легких сплавов применяются специальные зенкеры, особенностями конструкции которых являются увеличенный до 30° угол наклона винтовых канавок, увеличенная глубина канавок, увеличенный до 15° задний угол, фасонная задняя поверхность. При обработке отверстий диаметром 3...9 мм применяются двузубые зенкеры.

Для обработки опорных поверхностей под крепежные винты применяются **зенковки** со сменной цапфой 4 (рис. 6.33, б). Диаметр цапфы выбирают в зависимости от диаметра основного отверстия.

Зенковки с цилиндрическим хвостовиком выпускаются диаметром 15; 18; 20; 22 и 24 мм, зенковки с коническим хвостовиком — 15; 18; 20; 22; 24; 26; 30; 42; 43; 44; 46 и 50 мм. Для обработки конических поверхностей под головку винта и обработки центровых отверстий применяют зенковки, показанные на рис. 6.33, в. Они выполняются с углом конуса 60, 90 и 120°, диаметром 8... 80 мм. Для подрезки торцов и приливов применяются односторонние обратные (рис. 6.33, г) и двусторонние (рис. 6.33, г) зенковки из быстрорежущей стали или оснащенные пластинами из твердого сплава. Они крепятся на специальных оправках с помощью байонетного замка. Диаметры зенковок: 25; 42; 50; 60; 63; 80 и 100 мм.

Развертка (см. рис. 6.33, е) — чистовой осевой инструмент, позволяющий обрабатывать точные цилиндрические и конические отверстия на станках сверлильной, токарной, расточной групп или вручную. Развертка является единственным инструментом для обработки точных отверстий малого диаметра.

Цилиндрические развертки позволяют обрабатывать отверстия точностью по 6—11-му качествам с шероховатостью Ra 0,8... 1,6 мкм. Промышленностью выпускаются развертки с допусками по К7, Н7, Н8, Н9 и развертки с припуском под доводку (№ 1—6), которые потребитель перешлифовывает под необходимую посадку и точность отверстия. Очень важным параметром разверток является их исполнительный диаметр, который задается в виде предельных отклонений от номинального диаметра (табл. 6.10).

Ручные развертки выпускаются из инструментальной стали 9ХС в двух исполнениях: исполнение 1 — развертки с прямыми канавками диаметром 1... 50 мм, исполнение 2 — с винтовыми канавками диаметром 6... 50 мм. Хвостовик у разверток цилиндрический, заканчивающийся квадратом. Особенностью разверток является длинная рабочая часть 3, что обеспечивает их хорошее направление и центрирование по обрабатываемому отверстию.

Таблица 6.10. Допуски на диаметр разверток

Номинальный диаметр, мм	Отклонения, мкм		Номинальный диаметр, мм	Отклонения, мкм	
	верхнее	нижнее		верхнее	нижнее
1...3	-25	-44	18...30	-60	-74
3...6	-30	-50	30...50	-70	-87
6...10	-50	-50	50...80	-80	-105
10...18	-50	-62	80...100	-90	-120

При обработке сквозных или глухих отверстий по 8—9-му квалитетам принимается угол в плане $\varphi = 45^\circ$, для обработки по 7—8-му квалитетам — $\varphi < 45^\circ$.

Конические развертки предназначены для предварительной и чистовой обработки конических отверстий с конусностью 1:50, 1:30, 1:20, 1:16 и конусами Морзе. Особенностью конических разверток является отсутствие калибрующей части. Главными режущими кромками являются образующие конуса по всей длине зубьев. Они затачиваются по передней и задней поверхностям. Вдоль режущих кромок по конусу оставлена узкая ленточка шириной не более 0,05 мм, что позволяет точно выдержать конусную поверхность и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Передний и задний углы равны соответственно 5 и 10° .

Развертки для отверстий под конические штифты с конусностью 1:50 изготавливаются только чистовыми, остальные — черновыми и чистовыми. На режущих кромках черновых разверток нанесены стружкоразделительные канавки в виде прямоугольной резьбы.

Для удобства измерения реального размера разверток с помощью микрометра все их виды выполняются с четным числом зубьев, однако при равномерном шаге между зубьями возможна огранка обработанного отверстия. Поэтому у разверток зубья выполняются с неравномерным окружным шагом (см. рис. 6.33, е, сечение Б—Б). Только одна пара зубьев лежит в диаметральной плоскости, она и показывает реальный диаметр развертки.

Комбинированные инструменты. Такие инструменты подразделяются на две группы: для обработки предварительно обработанных отверстий и для обработки отверстий в сплошном материале. Их можно классифицировать по профилю обрабатываемого отверстия; по типу комбинирования (однотипные или разнотипные); по способу комбинирования режущих зубьев (с профильными зубьями, с зубьями, расположенными на отдельных ступенях, с одновременной работой, с чередующимися и смешанными зубьями); по конструктивному признаку (цельные и разъемные); по характеру работы ступеней (с последовательной работой, с одновременной работой, с частичным совмещением переходов обработки); по способу направления инструмента (по неподвижным кондукторным втулкам, по вращающимся кондукторным втулкам, по ранее обработанному отверстию); по виду обработки (черновая, получистовая, чистовая).

В зависимости от назначения и формы отверстий комбинированные инструменты составлены из сверл, зенкеров и разверток,

работающих или последовательно, или параллельно. Промышленностью выпускаются зенкер-развертка со вставными ножами с последовательной работой ступеней; развертка цельная с одновременной работой ступеней с передней и задней направляющими; зенкер двухступенчатый со вставными ножами с одновременной работой ступеней с передней направляющей; развертка ступенчатая с цилиндрическими передней и задней режущими ступенями и конической соединительной режущей ступенью; зенкер трехступенчатый с пластинами из твердого сплава с одновременной работой ступеней; зенкер трехступенчатый перовой цельный с одновременной работой ступеней; зенкер со вставными ножами с чередующимися зубьями с одновременной работой ступеней; сверло-развертка с задней направляющей частью (по кондукторной втулке); сверло-зенкер двухступенчатый составной (разъемная часть — сверло, неразъемная — зенкер) с последовательной работой ступеней; сверло-зенкер двухступенчатый цельный с последовательной работой ступеней.

6.6.3. Основные причины неполадок при работе зенкерами и развертками

В процессе работы зенкеров и разверток могут возникнуть следующие **неполадки**: выкрашивание режущих кромок, низкая стойкость или поломка инструмента, увод инструмента в процессе работы, высокая шероховатость и низкая точность обработанного отверстия, заклинивание инструмента в кондукторной втулке и др.

Выкрашивание режущих кромок может происходить из-за неправильной установки инструмента или заготовки на станке (перекос или несовпадение осей отверстия в заготовке и шпинделя станка), завышенных припусков на обработку, забивания стружечных канавок инструмента. При обработке вязких сталей заклинивание инструмента возможно при слишком малых задних углах или слишком широкой ленточке. Низкая стойкость инструмента возможна при завышении режимов резания, неправильном выборе инструментального материала, повышенном биении зубьев (неквалифицированная заточка или переточка инструмента), плохом охлаждении инструмента. Увод зенкера возможен из-за неправильной установки инструмента или заготовки на станке (перекос или несовпадение осей отверстия в заготовке и шпинделя станка). По этой же причине возможна низкая точность при

зенкерования. Кроме упомянутой причины, низкая точность при зенкерования возможна из-за наростообразования, а при раз-
вертывании из-за биения шпинделя станка, налипания частиц
обработанного материала на режущих кромках, завышенных
припусков на обработку. Высокая шероховатость обработанной
поверхности возможна из-за некачественной заточки инструмен-
та, грубой предварительной обработке заготовки, недостаточно-
сти или неправильного выбора СОТС, забивания стружечных ка-
навок.

6.6.4. Особенности процесса сверления

Процесс сверления протекает в более тяжелых условиях, чем
точение. При сверлении затруднен отвод стружки и подача охлажда-
ющей жидкости в зону резания. Стружка дополнительно трется
о поверхность канавок сверла, а ленточки сверла — об обработан-
ную поверхность. Выделяемая при резании теплота в основном
поглощается режущим инструментом и заготовкой. Особенно это
заметно при сверлении отверстий в материалах с низким коэффи-
циентом теплопередачи (например, пластмассы, бетон), при обра-
ботке которых до 95 % выделяемой теплоты поглощается сверлом,
и, если не использовать охлаждение, происходит оплавление ре-
жущих кромок сверла. Скорость резания по сечению сверла непо-
стоянна, она уменьшается от периферии сверла к его центру. Сле-
довательно, по сравнению с точением при сверлении увеличены
деформации срезаемого слоя и стружки и трение (пары: сверло —
заготовка, стружка — сверло, стружка — заготовка).

Силы резания при сверлении. Увеличение затраты энергии на
деформации и трение приводит к увеличению силы резания.

Равнодействующую силы резания (рис. 6.34), приложенную к
точке O режущей кромки, можно разложить на три составляющие
 P_x , P_y и P_z . Составляющая P_x направлена вдоль оси сверла, в том же
направлении действуют сила сопротивления деформациям на по-
перечной кромке $P_{п.к}$ и силы трения ленточек об обработанную
поверхность $P_{зл}$. Сумма сил $2P_x + 2P_{зл} + P_{п.к} = P_o$ называется «осевая
сила резания».

Радиальные силы резания при идеальной заточке сверла уравни-
вешивают друг друга: $\sum P_y = 0$. Пары сил P_z и $P_{зл}$ создают крутя-
щий момент M_k : $M_k = M(P_z) + M(P_{зл})$. В расчетах для определения
осевой силы и крутящего момента используют эмпирические фор-
мулы

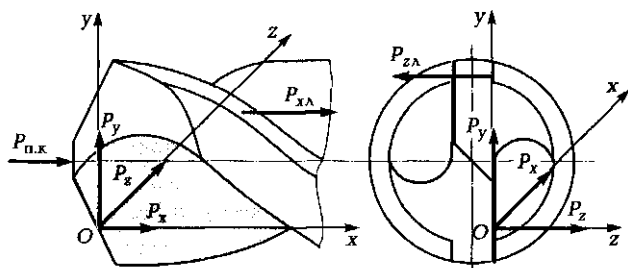


Рис. 6.34. Силы резания при сверлении:

$P_{п.к}$ — осевая сила на поперечной кромке; $P_{xл}$, $P_{xп}$ — силы трения на ленточке; P_y , P_z — составляющие силы резания

$$P_o = C_p D^{x_p} S_z^{y_p} K_p; M_k = C_M D^{x_M} S_z^{y_M} K_M,$$

где D — диаметр обрабатываемого отверстия, мм; S_z — подача на зуб, мм/зуб; C_p и C_M — постоянные коэффициенты, характеризующие обрабатываемый материал и условия резания; x_p , y_p , x_M , y_M — показатели степени; K_p и K_M — поправочные коэффициенты на изменение условий резания.

Режимы резания при сверлении. За скорость резания, м/мин, при сверлении принимают окружную скорость наиболее удаленной точки режущего лезвия. При назначении скорости движения подачи различают подачу минутную S_m , подачу на оборот S_o и подачу на зуб S_z . За глубину резания при сверлении отверстия в сплошном материале принимают половину диаметра сверла, при рассверливании, зенкерования и развертывании — половину разницы между диаметром обработанного отверстия и заготовки

$$v = \pi D n / 1000; S_m = n S_o = n z S_z; t_c = D / 2; t_p = (D - d) / 2,$$

где D — наружный диаметр сверла (диаметр обрабатываемого отверстия), мм; n — частота вращения шпинделя станка, мин^{-1} ; d — диаметр отверстия в заготовке, мм; t_c — глубина резания при сверлении, мм; t_p — глубина резания при рассверливании, зенкерования и развертывании, мм.

6.6.5. Станки сверлильной группы

В единичном и мелкосерийном производстве применяются **вертикально-сверлильные станки** (рис. 6.35, а). На фундаментах

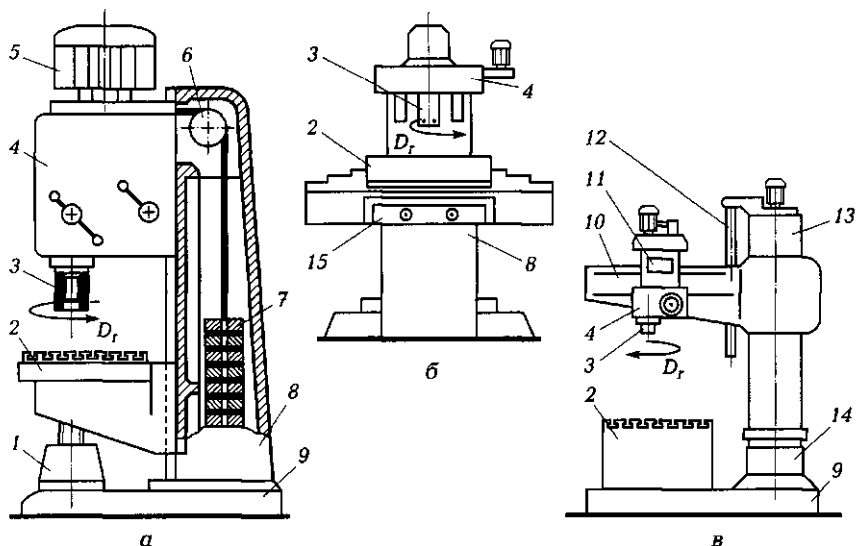


Рис. 6.35. Станки сверлильной группы:

а — вертикально-сверлильный станок; *б* — вертикально-сверлильный станок с ЧПУ; *в* — радиально-сверлильный станок; 1 — домкрат; 2 — стол; 3 — шпиндель; 4 — сверлильная головка; 5 — электродвигатель; 6 — блок; 7 — противовесы; 8 — вертикальная станина (колонна); 9 — фундаментная плита; 10 — траверса; 11 — коробка скоростей; 12 — винтовой механизм; 13 — гильза; 14 — тумба; 15 — салазки; D_r — движение резания

ной плите 9 смонтирована колонна 8. По вертикальным направляющим колонны перемещаются стол 2 и сверлильная головка 4. Установочные перемещения стола осуществляются вручную с помощью винтового домкрата 1. На верхней плоскости стола устанавливаются рабочие приспособления или заготовка. Установочные вертикальные перемещения сверлильной головки осуществляются вручную за счет системы противовесов 7, прикрепленных к сверлильной головке тросом, перекинутым через блок 6. Вращательное движение инструменту передается от электродвигателя 5 через коробку скоростей и шпиндель 3. Механизмы главного движения и движения подачи размещены внутри сверлильной головки.

В индивидуальном и серийном производстве широко применяют **вертикально-сверлильные станки с числовым программным управлением**. Особенностью станков с ЧПУ является сочетание легкой переналадки станка на обработку различных изделий с автоматическим или полуавтоматическим циклом работы. Верти-

кально-сверлильный станок с ЧПУ показан на рис. 6.35, б. По вертикальным направляющим станины 8 перемещаются салазки 15. Стол 2 перемещается по горизонтальным направляющим салазок. Движение стола и салазок осуществляется автоматически по программе, что обеспечивает точное перемещение заготовки относительно режущего инструмента. По направляющим вертикальной части станины (стойки) перемещается сверлильная головка 4 со шпинделями 3. Внутри сверлильной головки размещены механизмы главного движения и движения подачи. Все движения режущих инструментов осуществляются по программе.

При последовательной обработке нескольких отверстий в массивных или крупногабаритных заготовках применение вертикально-сверлильных станков крайне неудобно, так как практически невозможно точно совместить ось вращения режущего инструмента с осью обрабатываемого отверстия. Поэтому при обработке таких заготовок применяются **радиально-сверлильные станки**. При работе на радиально-сверлильных станках заготовка остается неподвижной, а шпиндель с инструментом перемещается относительно заготовки и может устанавливаться в требуемой точке горизонтальной плоскости.

Радиально-сверлильный станок показан на рис. 6.35, в. На фундаментной плите 9 закреплена тумба 14 с вертикальной колонной. На колонне установлена гильза 13. Гильза имеет возможность поворота относительно колонны в горизонтальной плоскости на 360° . Траверса 10 закреплена на гильзе с возможностью вертикального перемещения относительно колонны с помощью винтового механизма 12. На траверсе имеются горизонтальные направляющие, по которым перемещается сверлильная головка 4. Механизм сверлильной головки состоит из шпинделя 3, коробки скоростей 11 и коробки подачи. Заготовка устанавливается неподвижно на стол 2. Угловые перемещения траверсы и радиальные перемещения сверлильной головки в горизонтальной плоскости позволяют точно установить режущий инструмент относительно оси обрабатываемого отверстия.

6.7. РАСТАЧИВАНИЕ

Растачивание — лезвийная обработка резанием отверстий. Расточные станки в основном применяются для обработки отверстий с точно координированными осями. На расточных станках выполняется сверление, зенкерование, развертывание, растачива-

ние отверстий резцом, обтачивание наружных цилиндрических поверхностей и подрезка торцов резцом, нарезание резьбы и фрезерование плоскостей.

6.7.1. Особенности обработки заготовок на расточных станках

При растачивании формирование поверхностей происходит за счет сочетаний вращательного движения инструмента (главного движения) и движения подачи, сообщаемого инструменту или заготовке. Направление движения подачи может быть вертикальным, продольным или поперечным.

Наиболее характерным является обработка внутренних поверхностей расточными резцами (рис. 6.36, *а*). Расточные резцы работают в худших условиях, чем токарные. Они имеют меньшие размеры, зависящие от размера оправок и обрабатываемого отверстия, низкую жесткость системы «резец—оправка», стесненные условия резания, неблагоприятные условия для схода стружки, подачи СОТС.

Скорость резания, м/мин, при работе на расточных станках — окружная скорость наиболее удаленной точки главной режущей кромки режущего инструмента:

$$v = \pi Dn / 1000,$$

где D — диаметр обрабатываемой поверхности при резании резцом или диаметр инструмента при сверлении, зенкеровании, развертывании или фрезеровании, мм; n — частота вращения инструмента, мин⁻¹.

Глубина резания t равна разнице радиусов обработанного и обрабатываемого отверстий.

На расточных станках обрабатывают цилиндрические или конические отверстия, наружные цилиндрические или плоские поверхности, уступы, канавки, нарезают резьбу резцами.

Растачивание цилиндрических отверстий производят расточными резцами с целью увеличения диаметра и улучшения точностных параметров обработанного отверстия. При соотношении длины отверстия к его диаметру менее пяти применяют консольное закрепление резца или резцовой оправки (см. рис. 6.36, *а*). При соотношении больше пяти жесткость консольных оправок недостаточна, поэтому применяют двухопорные оправки — борштанги (рис. 6.36, *б*). Аналогичную схему обработки применяют

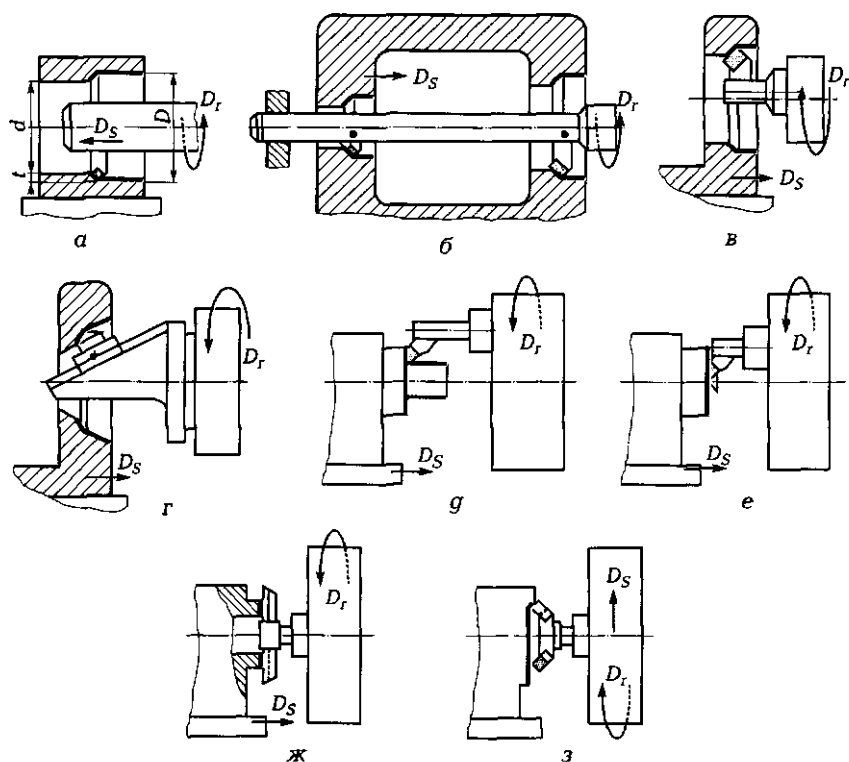


Рис. 6.36. Схемы обработки поверхностей на расточных станках:

а — растачивание консольным закреплением резца; *б* — растачивание борштангой; *в, г* — растачивание резцом, закрепленным в планшайбе; *д* — обтачивание; *е, ж* — подрезание торцов; *з* — обработка плоскостей; D_r — движение резания; D_s — движение подачи; d и D — диаметры заготовки и изделия соответственно; t — глубина резания

при черновом растачивании двух и более отверстий, имеющих общую ось. При этом повышается производительность обработки, но точность отверстий невелика. Поэтому чистовую обработку отверстий желательно проводить раздельно. Отверстия большого диаметра, но малой длины растачивают резцом, закрепленным на планшайбе (рис. 6.36, в). Отверстия с диаметром более 130 мм целесообразно растачивать резцовыми блоками или головками.

Отверстия с параллельными осями растачивают с одной установки. Вначале растачивают одно отверстие, далее перемещают стол расточного станка на расстояние, равное межцентровому расстоянию между осями отверстий, и растачивают следую-

щее отверстие. Отверстия с взаимно-перпендикулярными осями также растачивают с одной установки. После расточки одного отверстия стол станка поворачивают на 90° и растачивают второе отверстие.

Конические отверстия обрабатывают расточными головками, закрепленными в расточном шпинделе. Отверстия с диаметром более 80 мм растачивают, закрепив резец в специальном приспособлении, которое снабжено направляющими для перемещения резца под углом к оси вращения расточного шпинделя (рис. 6.36, г). Отверстия большой длины и диаметра растачивают, закрепив аналогичное приспособление на двухопорной оправке.

Сверление, зенкерование, развертывание, цекование, нарезание резьбы метчиком ведут, закрепив соответствующий инструмент в расточном шпинделе. Инструменту придают оба движения (главное и подачи).

Обтачивание наружных цилиндрических поверхностей производят резцом, закрепленным в специальной планшайбе (рис. 6.36, г). Резцу сообщают главное движение, заготовке — движение подачи.

Подрезание торцов можно провести двумя способами. Торцы подрезают проходным резцом (рис. 6.36, е), сообщая последнему радиальную подачу. Небольшие по площади торцы можно подрезать пластинчатым резцом (рис. 6.36, ж) на осевой подаче.

Развитые вертикальные плоскости можно обработать фрезой (рис. 6.36, з) на продольной подаче.

6.7.2. Режущий инструмент

Используемые на универсальных токарно-винторезных станках расточные резцы (рис. 6.37, а) имеют призматическое тело с утоньшением на конус (L_r) и отогнутую головку (L_T). Головка может выполняться целиком из быстрорежущей стали или с напаянной твердосплавной пластиной. Для расточных станков применяются **специальные расточные резцы** с прямоугольным (рис. 6.37, б) или круглым (рис. 6.37, в) сечением стержня.

Для расточки отверстий диаметром 3...12 мм применяют **цельные твердосплавные расточные резцы** (рис. 6.37, г). Резцы выполнены из двух частей: стального корпуса 2 и твердосплавной рабочей части 1, впаянной в отверстие корпуса. Резцы выпускаются трех типов: тип 1 — для координатно-расточных станков, тип 2 — для токарных автоматов, тип 3 — для токарных станков. Резцы

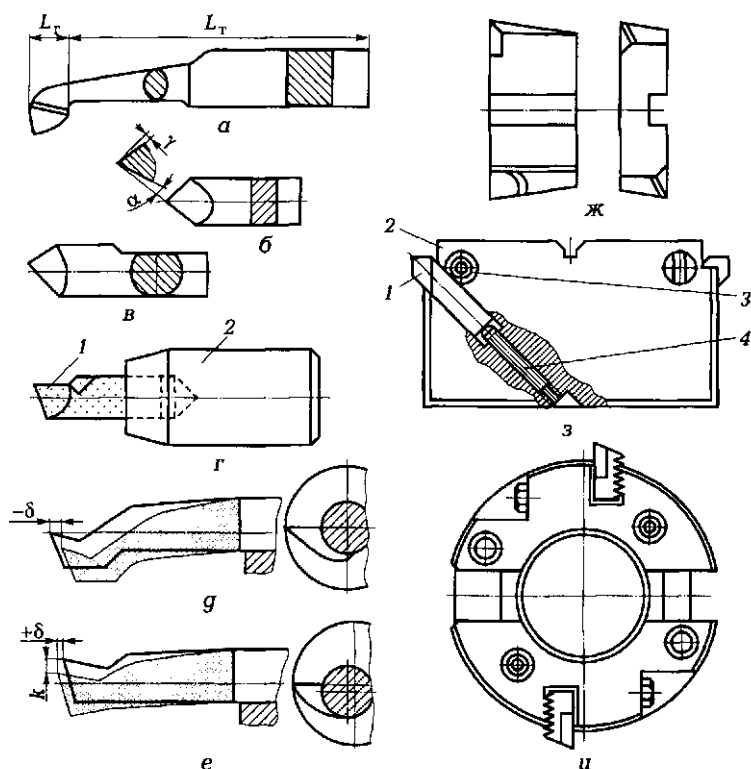


Рис. 6.37. Расточные резцы:

а — резец для универсального токарно-винторезного станка; б, в — резцы для специальных расточных станков; г — цельный твердосплавный резец; д — изгиб обычного резца; е — изгиб виброустойчивого резца; ж — пластинчатый резец; з — расточный блок; и — расточная головка; 1 — рабочая часть; 2 — корпус; 3, 4 — винты; L_T — тело резца; L_T — головка резца; k — изгиб резца; α , γ — углы резания; δ — врезание резца в обработанную поверхность

первых двух типов имеют цилиндрический хвостовик, третьего типа — квадратный хвостовик сечением 12...12 мм.

В общем случае расточные резцы выпускаются с режущей кромкой, расположенной выше оси корпуса (рис. 6.37, г) или с режущей кромкой, отогнутой вниз (рис. 6.37, е); последние еще называют *виброустойчивыми*. При деформации тонкой цилиндрической рабочей части резца она отгибается вниз. При расположении вершины резца выше оси корпуса вершина врезается в обрабатываемую поверхность (врезание $+\delta$). При расположении вершины резца ниже оси корпуса вершина отжимается от обрабатываемой

поверхности (врезание $-\delta$). Следовательно, в первом случае вибрации резца будут увеличиваться, во втором — уменьшаться. Виброустойчивый резец может иметь большее сечение, чем обычный, за счет более благоприятного его расположения в растачиваемом отверстии. При этом жесткость резца шестикратно увеличивается.

Для растачивания отверстий диаметром более 20 мм применяют **пластинчатые резцы** (рис. 6.37, ж). Различают одно- и двухлезвийные резцы. Однолезвийные резцы более универсальны, ими можно растачивать отверстия различных диаметров. Двухлезвийные — специальные резцы, их изготавливают по размеру растачиваемого отверстия.

При обработке отверстий диаметром более 40 мм применяются **сборные расточные блоки** (рис. 6.37, з). В пазах корпуса 2 расточного блока устанавливаются расточные резцы 1. На требуемый размер резцы регулируются винтом 4 и закрепляются винтом 3.

Обработку отверстий диаметром 130...225 мм ведут **расточными головками** (рис. 6.37, и). Подрезные резцы головки предварительно устанавливаются по диаметру и торцу, что позволяет обрабатывать как образующую, так и торец отверстия.

6.7.3. Расточные станки

Горизонтально-расточные станки (рис. 6.38, а) обеспечивают точность координат осей обрабатываемых отверстий до 0,03 мм. На станине 12 смонтирована передняя стойка 9. По вертикальным направляющим передней стойки с помощью винтового механизма 8 перемещается шпиндельная бабка 7, в которой размещены механизмы главного движения и движения подачи. Шпиндель 14 коробки скоростей полый, на нем закреплена планшайба 6 с радиальным суппортом 13. Внутри полого шпинделя размещен расточный шпиндель 5. Задняя стойка 1 с подшипником 2 и посадочным окном 3 предназначена для поддержки длинных расточных оправок. Подшипник перемещается синхронно со шпиндельной бабкой, что обеспечивает соосность посадочного окна и расточного шпинделя. Заготовка устанавливается на поворотном столе 4, состоящем из двух частей: поперечной каретки 10 и продольных салазок 11. Передняя 9 и задняя 1 стойки и продольные салазки 11 могут перемещаться по горизонтальным направляющим станины. Главное движение сообщается режущему инструменту, установленному в расточном шпинделе или в планшайбе. Движение подачи, в зависимости от вида обработки и ха-

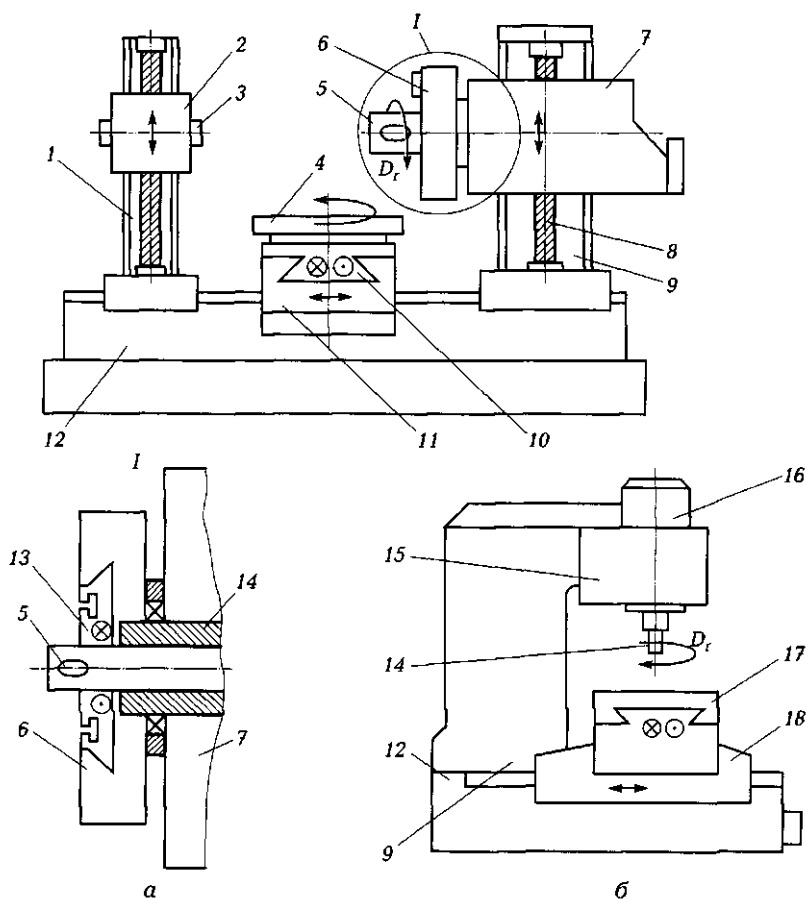


Рис. 6.38. Расточные станки:

а — горизонтально-расточный станок; *б* — координатно-расточный станок; 1 — задняя стойка; 2 — подшипник; 3 — посадочное окно; 4 — поворотный стол; 5 — расточный шпиндель; 6 — планшайба; 7 — шпиндельная бабка; 8 — винтовой механизм; 9 — передняя стойка; 10 — поперечная каретка; 11 — продольные салазки; 12 — станина; 13 — радиальный суппорт; 14 — шпиндель; 15 — расточная головка; 16 — коробка скоростей; 17 — стол; 18 — поперечные салазки; D_r — движение резания

рактера обрабатываемой поверхности, придается столу (за счет перемещения каретки или салазок) или инструменту (за счет радиального перемещения суппорта или вертикального перемещения шпиндельной бабки). На базе горизонтально-расточного станка выполнены конструкции других универсальных и специальных расточных станков.

На **координатно-расточных** станках обрабатывают точные отверстия с точностью координат осей 3...5 мкм. Одностоечный координатно-расточный станок (рис. 6.38, б) состоит из станины 12, стойки 9 и стола 17. В верхней части стойки размещена коробка скоростей 16. По вертикальным направляющим стойки перемещается расточная головка 15. Внутри расточной головки размещена коробка подач со шпинделем 14. Заготовку устанавливают на столе 17, состоящем из двух частей: продольной каретки и поперечных салазок 18. Координаты осей растачиваемых отверстий устанавливаются перемещением стола в двух взаимно перпендикулярных направлениях: продольном и поперечном. Для точного отсчета используется оптическая система.

На **алмазно-расточных** станках проводят окончательную обработку отверстий твердосплавным или алмазным инструментом. По числу расточных головок различают станки одностороннего и двустороннего действия. На станках двустороннего действия обрабатывают отверстия с параллельными осями с точностью координат осей 1...5 мкм. Высокая точность обработанных отверстий обусловлена применением высоких скоростей резания (200...1 000 м/мин), маленьких подач (0,01...0,1 мм/об) и глубин резания (0,05...0,2 мм).

6.8. ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Фрезерование — лезвийная обработка резанием линейчатых поверхностей многозубым инструментом — фрезой; главное движение, вращательное, придается инструменту, движение подачи, прямолинейное, придается заготовке в направлении любой из координатных осей.

Поверхность называется линейчатой, если она описывается движением образующей (прямой) по направляющей (некоторой линии). Фреза — цилиндрический многозубый инструмент с зубьями на торце и (или) образующей.

6.8.1. Схемы обработки поверхностей на станках фрезерной группы

Рассмотрим схемы обработки поверхностей на универсальных горизонтально-фрезерном (далее — ГФС) и вертикально-фрезерном (далее — ВФС) станках. (ГФС имеет горизонтальную ось вращения фрезы, ВФС — вертикальную.)

Горизонтальные плоскости фрезеруют цилиндрическими фрезами на ГФС (рис. 6.39, а) или торцевыми фрезами на ВФС (рис. 6.40, а). Горизонтальные плоскости чаще обрабатывают торцевыми насадными фрезами, так как они имеют более жесткое закрепление и обеспечивают плавную, безвибрационную обработку. При большой ширине обрабатываемой плоскости используют торцевые фрезы и обработку ведут в несколько последовательных рабочих ходов. Узкие горизонтальные плоскости удобно обрабатывать концевыми фрезами. Вертикальные плоскости на ГФС обрабатывают торцевыми насадными фрезами (рис. 6.39, б) или фрезерными головками, а на ВФС — концевыми фрезами (рис. 6.40, б). Большие по высоте вертикальные плоскости удобнее обрабатывать на ГФС с использованием вертикальной подачи. Обработку небольших по высоте вертикальных плоскостей можно обрабатывать на ГФС с помощью концевых или дисковых фрез. Наклонные плоскости небольшой ширины обрабатывают на ГФС одноугловой фрезой (рис. 6.39, в). Широкие наклонные плоскости обрабатывают на ВФС (рис. 6.40, в) с поворотом шпиндельной головки торцевой насадной или концевой фрезами. Одновременную обработку нескольких поверхностей (вертикальных, горизонтальных и на-

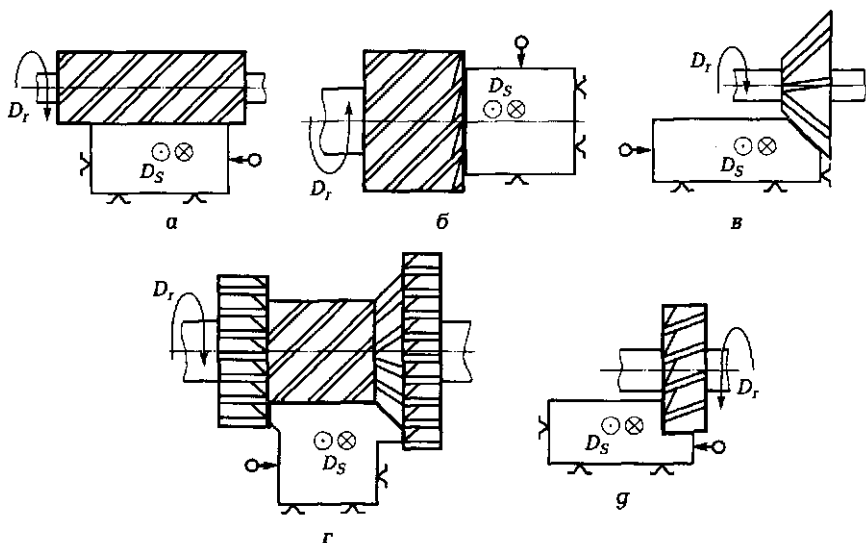


Рис. 6.39. Обработка плоскостей на ГФС:

а — горизонтальных; б — вертикальных; в — наклонных; г — нескольких плоскостей одновременно; г — уступов; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

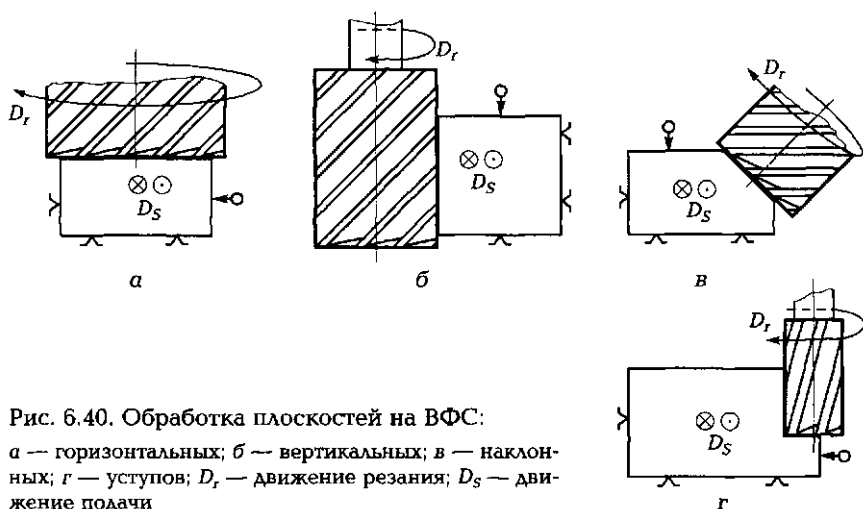


Рис. 6.40. Обработка плоскостей на ВФС:

а — горизонтальных; б — вертикальных; в — наклонных; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

клонных) ведут на ГФС (рис. 6.39, г), установив на оправку набор фрез. Горизонтальные уступы и пазы обрабатывают дисковыми односторонними (рис. 6.39, г) и трехсторонними (рис. 6.41, а) фрезами на ГФС или концевыми фрезами (рис. 6.40, г, 6.41, б) на ВФС. Фасонные пазы с криволинейной образующей обрабатывают на ГФС фасонными дисковыми фрезами (рис. 6.41, в). Пазы типа «ла-

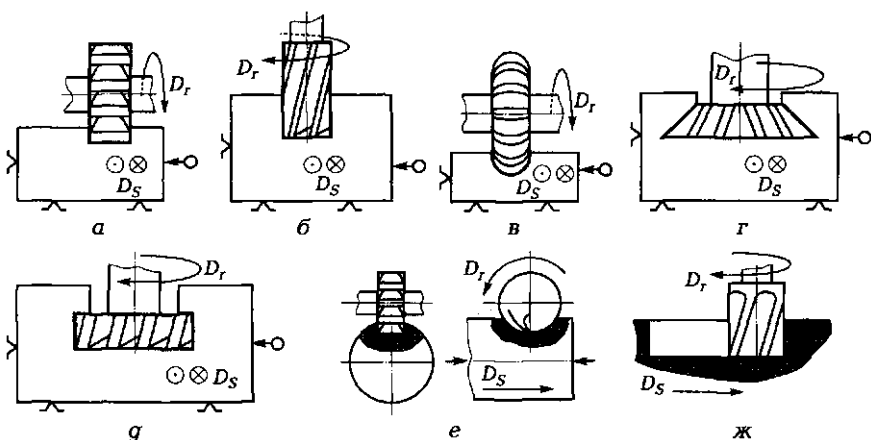


Рис. 6.41. Обработка пазов:

а, б — прямоугольных; в — полукруглых; г — типа «ласточкин хвост»; д — Т-образных; е, ж — шпоночных; D_r — движение резания; D_s — движение подачи

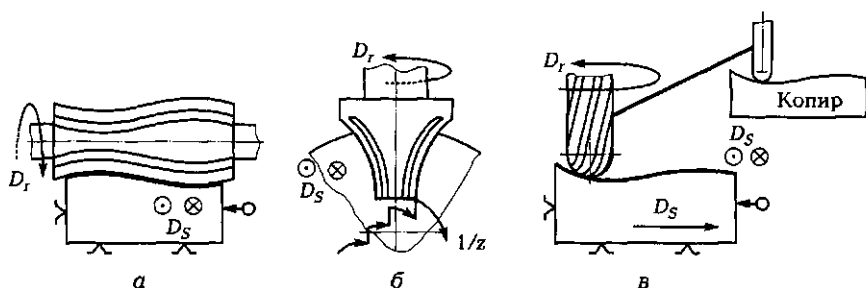


Рис. 6.42. Обработка фасонных поверхностей:

а, б — методом копирования цилиндрическими и концевыми фрезами соответственно; в — по копиру; D_r — движение резания; D_s — движение подачи; $1/z$ — делительный поворот

сточкин хвост» или Т-образные обрабатывают на ВФС (рис. 6.41, г, г). Вначале концевой фрезой получают прямоугольный паз, затем используют концевую одноугловую фрезу или специальную концевую фрезу для Т-образных пазов. Шпоночные пазы для сегментных шпонок фрезеруют на ГФС дисковой трехсторонней фрезой (рис. 6.41, е); для прямоугольных шпонок — на ВФС концевой фрезой (рис. 6.41, ж). Фасонные поверхности обрабатывают *методом копирования* (используются фасонные цилиндрические (рис. 6.42, а), дисковые или концевые (рис. 6.42, б) фрезы), *по копиру* на специальных копировальных фрезерных станках (рис. 6.42, в), *методом обката* на специальных станках.

6.8.2. Схемы фрезерования

Цилиндрическое и торцевое фрезерование в зависимости от направления движений резания и подачи можно осуществить двумя способами: *попутным фрезерованием*, когда совпадают направления главного движения и движения подачи, и *встречным фрезерованием*, когда направления главного движения и движения подачи не совпадают.

При попутном фрезеровании (рис. 6.43, а) толщина срезаемого слоя изменяется от максимальной до нуля, зуб врежется в заготовку с ударом. Горизонтальная составляющая силы резания направлена по подаче, а вертикальная — вниз, на заготовку. При встречном фрезеровании (рис. 6.43, б) толщина срезаемого слоя изменяется от нуля до максимальной (зуб плавно врежется в за-

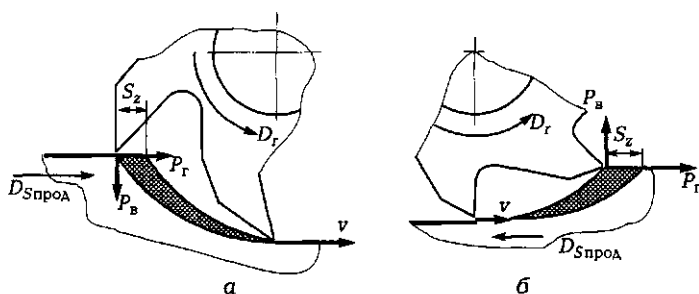


Рис. 6.43. Попутное и встречное фрезерование:

a — попутное; *б* — встречное; D_r — движение резания; $D_{спрoд}$ — движение продольной подачи; P_r и P_v — горизонтальная и вертикальная составляющие силы резания соответственно; S_z — подача на зуб; v — скорость резания

готовку), горизонтальная составляющая силы резания направлена против подачи, а вертикальная — вверх.

Рациональность использования какой-либо схемы обусловлена требованием к качеству обработки, условиями обработки заготовки и состоянием фрезерного станка. При черновой обработке литых заготовок (особенно литья в песчано-глинистые формы), имеющих твердую поверхностную корку, использование попутного фрезерования нерационально, так как удар зуба фрезы об эту корку приводит его к выкрашиванию или поломке. Лучше использовать встречное фрезерование. Зуб начинает работу в мягком материале сердцевины заготовки, подходя к корке, он взламывает ее. При чистовом фрезеровании, наоборот, рациональнее использовать попутное фрезерование. Теоретически при встречном фрезеровании резание начинается с нулевой толщины срезаемого слоя, которая постепенно увеличивается. Однако режущая кромка зуба фрезы имеет радиус округления, равный 0,03...0,05 мм. При чистовом фрезеровании толщина резания невелика, поэтому в начале резания зуб не режет, а скользит по обрабатываемой поверхности без снятия стружки. При этом создаются значительные напряжения сжатия в поверхностных слоях заготовки, приводящие к их значительному наклепу, повышенному истиранию режущей кромки зуба, вибрациям в системе УТС и плохому качеству обработанной поверхности. При попутном фрезеровании толщина срезаемого слоя невелика, поэтому ударное вхождение зуба в материал заготовки не вызовет существенных колебаний в системе УТС, что способствует стабильной работе фрезы, а шероховатость обработанной поверхности улучша-

ется на один класс. Особенно эффективно попутное фрезерование при обработке вязких материалов, склонных к наклепу и налипанию.

При обработке горизонтальных плоскостей нежестких заготовок или заготовок относительно небольшой толщины (до 30 мм) встречным фрезерованием вертикальная составляющая силы резания будет отрывать заготовку от стола. Это приведет к неравномерности глубины срезаемого слоя (большая погрешность обработки по толщине заготовки) или потребует слишком больших усилий на закрепление заготовки (при этом возможны деформации заготовки). Лучше использовать попутное фрезерование, когда вертикальная составляющая силы резания прижимает заготовку к столу. При обработке заготовок на изношенных станках применение попутного фрезерования приводит к прерывистости процесса резания. Причины этого явления лежат в конструктивном исполнении механизма движения подачи стола. Для преобразования вращательного движения в поступательное используется пара «винт—гайка». Этот механизм, естественно, выполнен с зазорами по резьбе, и, чем более изношен станок, тем больше эти зазоры. При направлении горизонтальной составляющей силы резания по подаче гайка, связанная со столом, обгоняет винт в пределах зазоров в резьбе. При больших зазорах процесс резания прерывается. Когда винт догонит гайку, резание возобновляется. Процесс прерывания циклически повторяется. Для плавного резания необходимо использовать станки со специальными гидравлическими компенсаторами зазоров в паре «винт—гайка», использовать станки с беззазорными шарико-винтовыми парами или применять встречное фрезерование. При встречном фрезеровании горизонтальная составляющая силы резания прижимает гайку к винту, и процесс резания непрерывен.

6.8.3. Особенности процесса фрезерования, режимы и силы резания, элементы и геометрия фрез

Особенностями процесса фрезерования являются прерывистый характер процесса резания каждым зубом фрезы и переменность толщины срезаемого слоя. Каждый зуб фрезы участвует в резании только на определенной части оборота фрезы, остальную часть проходит по воздуху, холостую, что обеспечивает охлаждение зуба и дробление стружки.

При цилиндрическом фрезеровании плоскостей работу резания осуществляют зубья, расположенные на цилиндрической поверхности фрезы. При торцевом фрезеровании плоскостей работу резания осуществляют зубья, расположенные на цилиндрической и торцевой поверхностях фрезы.

К режимам резания при фрезеровании относят скорость резания v , подачу (минутную, на оборот и на зуб), глубину резания t и ширину фрезерования B . Скорость резания берется как окружная скорость вращения фрезы:

$$v = \pi D_{\text{ф}} n / 1000,$$

где $D_{\text{ф}}$ — наружный диаметр фрезы, мм; n — частота вращения шпинделя, мин^{-1} .

Зависимость между подачами следующая:

$$S_{\text{м}} = n S_0 = n z S_z.$$

Влияние диаметра фрезы на производительность обработки неоднозначно. С увеличением диаметра фрезы повышается расчетная скорость резания при постоянной стойкости. Это объясняется тем, что уменьшается средняя толщина срезаемого слоя, улучшаются условия охлаждения зуба фрезы, так как увеличивается время нахождения зуба вне зоны резания. Степень влияния диаметра на скорость резания можно выразить формулой

$$v_2/v_1 = (D_2/D_1)^q,$$

где v_2 и v_1 — расчетные скорости резания сравниваемых фрез, имеющих диаметры соответственно D_2 и D_1 ; q — показатель степени, характеризующий влияние диаметра фрезы на скорость резания при одинаковой стойкости. Значения q для обработки низколегированных, низкоуглеродистых сталей приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11. Значения q

Вид фрезы	Материал режущей части фрезы	
	Сталь Р18	Твердый сплав Т15К6
Торцевые	0,25	0,2
Дисковые	0,25	0,2
Цилиндрические	0,45	0,17
Концевые	0,45	0,44

В целях повышения производительности лучше выбирать фрезы большего диаметра, так как с увеличением скорости резания пропорционально увеличится и частота вращения фрезы, и минутная подача (при пропорциональном увеличении числа зубьев фрезы). Но производительность обработки пропорционально не увеличится, поскольку число зубьев фрезы увеличивается непропорционально увеличению ее диаметра. Поэтому минутная подача будет увеличиваться не пропорционально увеличению диаметра фрезы, а с учетом коэффициента K_v :

$$K_v = v_2/v_1 = (D_2/D_1)^q; S_{m2} = K_v S_{m1}.$$

При выборе диаметра фрезы нужно учитывать, что увеличение диаметра приведет к увеличению пути врезания и перебега, что снизит производительность. Возможность увеличения диаметра фрез также ограничивается мощностью и жесткостью станка, размерами инструментального отверстия в шпинделе станка.

В процессе работы фреза должна преодолеть суммарные силы резания, действующие на каждый зуб, находящийся в контакте с заготовкой. При фрезеровании цилиндрической прямозубой фрезой равнодействующую силу резания P можно разложить на окружную составляющую P_z , касательную к траектории движения зуба, и на радиальную составляющую P_y , направленную по радиусу (рис. 6.44, а). Силу P можно разложить и на вертикальную P_v и горизонтальную P_r составляющие. При фрезеровании цилиндрическими косозубыми фрезами в осевом направлении действует осевая сила P_o (рис. 6.44, б), причем, чем больше угол наклона винтовых канавок фрезы ω , тем она больше. Осевая сила может сдвинуть фрезу вдоль оправки, поэтому часто применяют набор из двух фрез с разным направлением зубьев или одну фрезу с разнонаправленными зубьями (шевронную фрезу). В этом случае осевые силы уравниваются друг друга. Окружная сила P_z производит основную работу резания, по ней определяют эффективную мощность N и рассчитывают детали и узлы механизма главного движения (коробки скоростей) на прочность.

Радиальная сила $P_y = (0,6 \dots 0,8)P_z$ действует на подшипники шпинделя и изгибает оправку, на которой устанавливается фреза. Осевая сила $P_o = (0,35 \dots 0,55)P_z$ действует на подшипники шпинделя и механизм поперечной подачи станка. Горизонтальная P_r и вертикальная P_v силы действуют на механизмы продольной и вер-

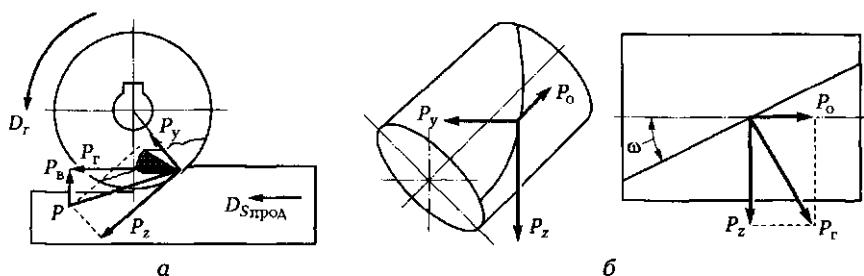


Рис. 6.44. Силы резания при фрезеровании:

а — разложение силы резания; б — осевая сила; D_r — движение резания; $D_{спр}$ — движение продольной подачи; P_x , P_z и P_y — составляющие силы резания на координатные оси; P_r и P_b — горизонтальная и вертикальная составляющие силы резания соответственно; ω — угол наклона зуба фрезы

тикальной подач станка. Окружную силу рассчитывают по эмпирической формуле

$$P_z = C_p S_z^{x_p} t^{y_p} B D_\phi^{-q_p},$$

где C_p — коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и условия обработки; S_z — подача на зуб, мм/зуб; t — глубина резания, мм; B — ширина фрезерования, мм; D_ϕ — диаметр фрезы, мм; x_p , y_p , q_p — показатели степени.

Крутящий момент и эффективную мощность рассчитывают по формулам

$$M_k = P_z D_\phi / (2 \cdot 1000); N = M_k n / (60 \cdot 1000).$$

На рис. 6.45, а показана цельная цилиндрическая косозубая фреза, состоящая из корпуса 2 и режущих зубьев 1. Зуб фрезы имеет переднюю 3 и заднюю 6 поверхности, спинку зуба 7, ленточку 5 и главную режущую кромку 4. Режущее лезвие зуба торцевой фрезы (рис. 6.45, б) имеет более сложную форму. Она состоит из главной режущей кромки 4, переходной кромки 8 и вспомогательной кромки 9.

Фрезы общего назначения выполняются с острозаточенной задней поверхностью и затылованные. Спинка острозаточенного зуба может быть одноугловой, двухугловой (сечение А—А) и криволинейной. Одноугловая форма наиболее проста в изготовлении и применяется для фрез с малым числом зубьев, торцевых и фасонных. Двухугловая форма обеспечивает большую прочность зуба, применяется для дисковых и твердосплавных фрез. Спинка затылованного зуба очерчена дугой окружности. Криволинейная

форма обеспечивает наивысшую прочность зуба и применяется для концевых фрез. Высота зуба h и форма впадины между зубьями, особенно радиус впадины r , — важные параметры фрезы, влияющие на прочность зуба. Для размещения стружки необходимо соблюдать условие

$$r \geq \sqrt{S_z t}.$$

Стандартные фрезы выполняются с нормальным (мелким) и крупным зубом. Фрезы с нормальным зубом предназначены для работы с облегченными режимами резания. Благодаря большому числу зубьев производительность их выше, чем у фрез с крупным зубом. Фрезы с крупным зубом применяются при обработке глубоких пазов, уступов и плоскостей в заготовках из алюминиевых и медных сплавов, при обработке стальных заготовок на нежестких станках.

Число зубьев фрезы влияет на производительность обработки. Минимальное число зубьев должно быть таким, чтобы при мини-

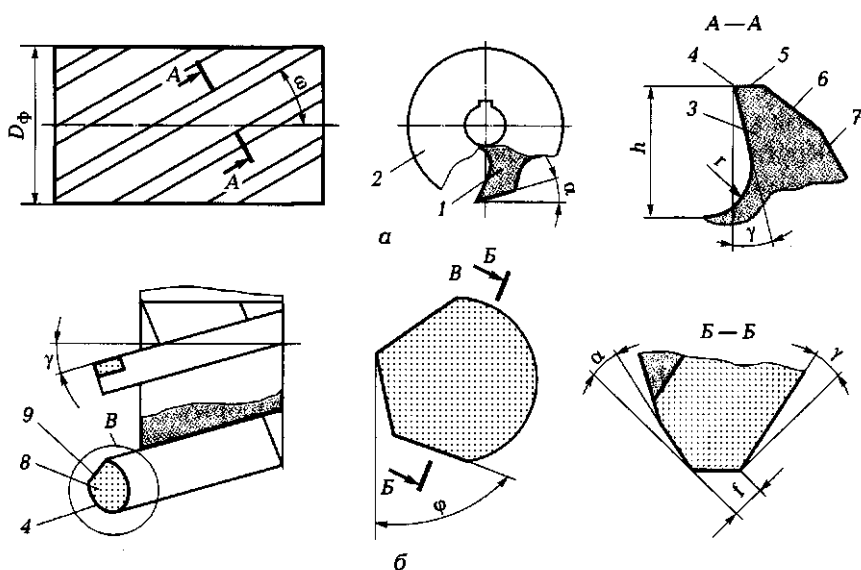


Рис. 6.45. Заточка фрез:

a — цилиндрических; b — торцевых; 1 — режущий зуб; 2 — корпус фрезы; 3 — передняя поверхность; 4 — главная режущая кромка; 5 — ленточка; 6 — задняя поверхность; 7 — спинка зуба; 8 — переходная кромка; 9 — вспомогательная кромка; D_Φ — диаметр фрезы; f — фаска; h — высота зуба; r — радиус впадины между зубьями; α , γ , ϕ — углы резания; ω — угол наклона винтовой канавки

мальной глубине срезаемого слоя в работе находилось не менее 2—3 зубьев, что обеспечит плавность фрезерования.

Передний угол γ измеряется в сечении $A—A$, перпендикулярном главной режущей кромке. Передний угол влияет на деформации срезаемого слоя и прочность режущего лезвия. Чем больше этот угол, тем меньше деформации срезаемого слоя, меньше силы резания и температура, но уменьшается и прочность зуба.

Главный задний угол α измеряется в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Для фрез он принимается несколько большим, чем для токарных резцов (поскольку для фрез условия трения и изнашивания на задней поверхности хуже). При толщине срезаемого слоя до 0,08 мм $\alpha = 18...20^\circ$, при толщине срезаемого слоя более 0,08 мм $\alpha = 12...15^\circ$.

Главный угол в плане ϕ влияет на ширину и толщину срезаемого слоя, на соотношение составляющих силы резания, на прочность вершины зуба. С уменьшением этого угла увеличивается активная длина главной режущей кромки, уменьшается толщина срезаемого слоя, повышается стойкость фрезы, а если оставить стойкость неизменной, можно повысить скорость резания и величину подачи на зуб. Рекомендуется применять фрезы с малыми углами ϕ при работе на станках повышенной жесткости при небольшой глубине срезаемого слоя. Концевые, дисковые и пазовые фрезы выполняются с постоянным углом ϕ , равным 60 или 90°. Поэтому упрочнить режущую кромку можно за счет заточки переходной режущей кромки (фаски f) с главным углом в плане ϕ , равным 30 или 45°.

Выполнение зубьев по винтовой линии с углом наклона винтовой канавки ω обеспечивает плавность врезания зуба и равномерность фрезерования. При этом увеличивается фактический передний угол, измеряемый в направлении схода стружки, что облегчает процесс резания, не уменьшая прочности зуба. Например, увеличение угла наклона зубьев ω с 10 до 60° увеличивает стойкость фрезы в 3—5 раз.

6.8.4. Типы фрез

Цилиндрические фрезы имеют зубья только на образующей, обычно используются в наборе из двух и более фрез для обработки ступенчатых поверхностей заготовок. Промышленностью выпускаются цельные цилиндрические фрезы из быстрорежущей стали и сборные цилиндрические фрезы, оснащенные винтовыми пластинами из твердого сплава.

Быстрорежущие фрезы выпускаются двух типов: тип 1 — с мелким зубом, тип 2 — с крупным зубом. Тип 1 используется для полустойковой и чистой обработки плоскостей, тип 2 — для черновой обработки. Размеры выпускаемых мелкозубых фрез (наружный диаметр \times длина \times число зубьев): $50 \times (50; 63; 80) \times 12$; $63 \times (50; 63; 80; 100) \times 14$; $80 \times (63; 80; 100; 125) \times 18$. Крупнозубые фрезы имеют такие же размеры, но число зубьев соответственно 6; 8; 10 (12). Передний и задний углы у обоих типов фрез $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 16^\circ$, угол наклона винтовых канавок у мелкозубых фрез $30 \dots 35^\circ$, у крупнозубых — 40° . Твердосплавные фрезы имеют размеры: $63 \times (45; 70; 96) \times 8$; $80 \times (45; 70; 96) \times 8$; $100 \times (45; 72; 100) \times 10$; $125 \times (70; 100) \times 12$. Передний угол у этих фрез отрицательный (-15°), задний угол 16° , угол наклона винтовых канавок для фрез диаметром 63 мм — 24° , диаметром 80 и 100 мм — 30° , диаметром 125 мм — 46° .

Цельные дисковые фрезы из быстрорежущей стали бывают пазовые, с зубьями на образующей и одном из торцов — двусторонние, на образующей и обоих торцах — трехсторонние, одноугловые, двуугловые, полукруглые выпуклые, полукруглые вогнутые, прорезные (шлицевые) и отрезные.

Дисковые трехсторонние фрезы предназначены для фрезерования пазов по 9-му качеству и уступов в стальных и чугунных заготовках. Размерный ряд фрез (наружный диаметр \times ширина \times диаметр отверстия \times число зубьев): $50 \times (4 \dots 10) \times 16 \times 14$; $63 \times (4 \dots 16) \times 22 \times 16$; $80 \times (5 \dots 20) \times 27 \times 18$; $100 \times (6 \dots 25) \times 32 \times 20$; $125 \times (8 \dots 28) \times 32 \times 22$. Изменение ширины фрезы: от 4 до 10 мм — через 1 мм; от 10 до 20 мм — через 2; 22; 25 и 28 мм. Выпускаются фрезы с прямыми зубьями (50...125 мм) и с разнонаправленными зубьями (63...125 мм), угол наклона зубьев — 15° . Геометрические параметры режущей части: передний угол 15° , задний угол периферийных зубьев 20° , торцевых — 6° . Недостатком этих фрез является их сложная заточка, выполняемая как по диаметру, так и по торцам, при этом теряется размер по ширине фрезы после переточки.

Пазовые фрезы более просты по конструкции, чем трехсторонние. Для сохранения размера фрезы по ширине при переточке зубья на торцевых режущих кромках выполнены без вспомогательного угла в плане и имеют длину 1 мм. Поэтому переточка фрезы выполняется только по главной режущей кромке.

Угловые фрезы предназначены для обработки пазов, скосов и винтовых поверхностей на режущем инструменте. Фрезы с углом $\phi = 50 \dots 85^\circ$ имеют угол ϕ' , равный 15° , при $\phi = 90^\circ \phi' = 20^\circ$, при $\phi = 100^\circ \phi' = 25^\circ$.

Полукруглые выпуклые и вогнутые фрезы предназначены для фрезерования фасонных (полукруглых) канавок и выступов. Выпускаются диаметром 50...130 мм. Радиус профиля канавки (выступа): 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 14; 16; 18; 20 и 25 мм.

Прорезные (штицевые) и отрезные фрезы предназначены для обработки узких канавок или для отрезания (разрезания) материала. Они работают в очень неблагоприятных условиях: жесткая рабочая часть, наличие двух боковых (вспомогательных) режущих кромок при малой главной режущей кромке, стесненные условия образования и отвода стружки — все это приводит к частым поломкам фрез, вибрациям при резании, выбору малых подач на зуб (0,002...0,02 мм/зуб).

Промышленностью выпускаются фрезы диаметром 20...320 мм, шириной 0,2...6 мм, с числом зубьев 14—160. В зависимости от числа зубьев фрезы разделены на три типа: тип 1 — фрезы с мелким зубом, тип 2 — со средним зубом, тип 3 — с крупным зубом.

Фрезы с мелким зубом характеризуются большим числом зубьев. Передняя и задняя поверхности образованы канавкой с углом 60°. Зуб фрезы имеет низкую прочность, поэтому фрезы применяются для работы с глубиной резания, не превышающей ширины фрезы (мелкие пазы, неглубокие канавки и шлицы, отрезание тонких листов).

Фрезы со средним зубом имеют примерно в 2 раза меньше зубьев, чем фрезы типа 1, т. е. более емкую стружечную канавку. Выпускаются две формы зуба: форма 1 — аналогична форме мелкозубых фрез, форма 2 — зуб снабжен ленточкой по задней поверхности (вспомогательный задний угол равен 20°). Применение ленточки шириной 0,5...1 мм позволяет обрабатывать более глубокие пазы с большими подачами на зуб.

Фрезы с крупным зубом имеют примерно в 2 раза меньше зубьев, чем фрезы типа 2, применяются для прорезки глубоких пазов в заготовках из вязких материалов, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей.

Промышленностью выпускаются дисковые фрезы со вставными пластинами из быстрорежущей стали, со вставными или напаянными пластинами из твердого сплава. Применение вставных пластин удешевляет и упрощает переточку фрезы и обеспечивает уменьшение расхода дорогостоящих инструментальных материалов. Применение твердого сплава позволяет повысить скорость резания, а следовательно, и производительность обработки.

Торцевые фрезы более универсальны, чем цилиндрические. В основном их применяют для обработки плоскостей. Обычно

торцевые фрезы выполняются цельными из быстрорежущей стали, сборными со вставными ножами из быстрорежущей стали, сборными со вставными или напаянными пластинами из твердого сплава, сборными с механическим креплением многогранных или круглых вращающихся неперетачиваемых твердосплавных пластин.

Сборные фрезы с ножами из быстрорежущей стали выпускаются диаметром 80...250 мм, с ножами, оснащенными твердым сплавом, — 100...630 мм. Эти фрезы состоят из стального корпуса, в пазах которого с помощью клиньев зажимаются режущие ножи. Конструктивно сборные фрезы с механическим креплением неперетачиваемых пластин отличаются тем, что в пазы стального корпуса вставляются резцы прямоугольного сечения. На резцах механическим способом крепятся неперетачиваемые пластины. Каждый резец установлен с возможностью перемещения вдоль пазов корпуса с помощью специального винта. Эффективность этих фрез по сравнению с фрезами со вставными ножами состоит в повышении стойкости в 1,5—2 раза, сокращении машинного времени обработки на 25...50 %, сокращении расхода твердых сплавов, в возможности использования хрупких или не поддающихся напайке твердых или иных сплавов, аннулировании операции заточки фрезы (после изнашивания одной грани пластины последняя поворачивается, и резание происходит неизношенной гранью), возможности настройки фрезы на обработку определенного размера.

Концевые фрезы выполняются цельными из быстрорежущей стали или с напаянными пластинами из твердого сплава. Концевыми фрезами обрабатываются плоскости, уступы, прямоугольные и призматические пазы, криволинейные поверхности и др. Промышленностью выпускаются фрезы общего назначения (для обработки конструкционных сталей и чугунов) и специализированные (для обработки легких сплавов, труднообрабатываемых материалов).

Цельные фрезы из быстрорежущих сталей выполняются с цилиндрическим или коническим хвостовиком, с крупным или мелким зубом (тип 1 или 2). Фрезы для обработки стали и чугуна выполняются со спиральными канавками с неравномерным окружным шагом. Угол наклона спирали 30...45°, передний угол 15°, задний угол 14°.

Цельные твердосплавные фрезы используются для обработки заготовок из коррозионно-стойких, высокопрочных, жаропрочных сталей и титановых сплавов. Диаметр фрез 3...12 мм, длина

режущей части 8...25 мм. Фрезы выполняются с неравномерным окружным шагом зубьев. Материал режущей части — твердые сплавы ВК6М, ВК8, ВК10М. Геометрические параметры режущей части фрез: главные передний и задний углы 5 и 15° соответственно. *Твердосплавные фрезы с напаянными пластинами* выпускаются с прямыми и винтовыми канавками.

Фрезы для обработки Т-образных пазов выпускаются с цилиндрическим или коническим хвостовиком. Фрезы с цилиндрическим хвостовиком выполняются диаметром 6...24 мм, с числом зубьев — 6 или 8, с наклоном зубьев 10°. Фрезы с коническим хвостовиком выпускаются в двух исполнениях: исполнение 1 — диаметр 6...28 мм, число зубьев 6 или 8, наклон зубьев 10°, рекомендуются для работы по чугуну; исполнение 2 — диаметр 10...54 мм, число зубьев 4, 6 или 8, наклон зубьев 15...25°, рекомендуются для работы по стали.

Шпоночные фрезы предназначены для получения шпоночных пазов под призматическую или сегментную шпонку. Промышленность выпускает фрезы для призматических шпонок (цельные быстрорежущие и твердосплавные, с напаянными пластинами из твердого сплава), фрезы для сегментных шпонок (цельные быстрорежущие). Фрезы шпоночные цельные быстрорежущие выпускаются с цилиндрическим хвостовиком — диаметром 2...25 мм, с коническим хвостовиком — диаметром 10...40 мм.

Фрезы шпоночные цельные твердосплавные выпускаются с цилиндрическим хвостовиком диаметром 2...12 мм. Фрезы с напаянными пластинами из твердого сплава имеют диаметр 10...25 мм. Фрезы для пазов сегментных шпонок выпускаются под шпонки от 4×1 до 10×2,5 мм.

Фрезы фасонные — фрезы, имеющие фасонную образующую. Предназначаются для обработки фасонных поверхностей. Обычно крупные предприятия, имеющие собственное ремонтно-инструментальное производство, самостоятельно изготавливают необходимые им фасонные фрезы. Промышленностью выпускаются фрезы дисковые полукруглые выпуклые и вогнутые, фрезы модульные дисковые или концевые для нарезания зубчатых венцов цилиндрических колес методом копирования.

6.8.5. Станки фрезерной группы

В условиях единичного и мелкосерийного производства широко используются универсальные консольно-фрезерные станки:

горизонтально-фрезерные без поворотного стола, горизонтально-фрезерные с поворотным столом, вертикально-фрезерные.

На рис. 6.46, *а* представлены основные узлы **горизонтально-фрезерного** станка с поворотным столом. На фундаментной плите 1 установлена чугунная станина 2, внутри которой расположены отсек для электрооборудования, коробка скоростей 3 и шпиндельный узел 5. По верхним направляющим станины перемещается хобот 4. Хобот может устанавливаться относительно станины с различными размерами вылета. Серьга 8 перемещается по направляющим хобота и закрепляется гайкой. Хобот совместно с серьгой обеспечивает жесткость фрезерной оправки с серьгой. С помощью винтового домкрата по вертикальным направляющим станины перемещается консоль 11 — базовый узел, распределяющий подачу на продольную, поперечную и вертикальную. По горизонтальным направляющим консоли перемещаются продольные салазки 10. По верхним направляющим вертикальных салазок перемещаются поперечные салазки 6. На продольных салазках установлены поворотные салазки 9 и стол 7. Вертикальное, продольное и поперечное движения подачи стола могут осуществляться вручную или с использованием коробки подач, размещенной в консоли. Вращательное движение выходного вала коробки подач преобразуется в поступательное перемещение стола с помощью механизмов «ходовой винт — гайка». На верхней части стола выполне-

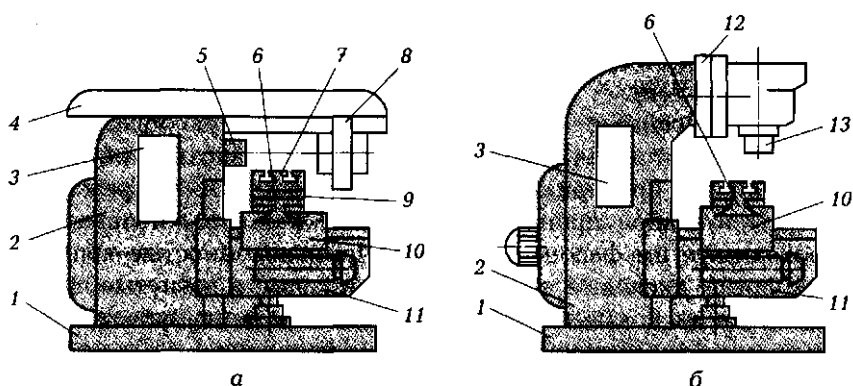


Рис. 6.46. Универсальные фрезерные станки:

а — горизонтально-фрезерный; *б* — вертикально-фрезерный; 1 — фундаментная плита; 2 — станина; 3 — коробка скоростей; 4 — хобот; 5 — шпиндельный узел; 6 — поперечные салазки; 7 — стол; 8 — серьга; 9 — поворотные салазки; 10 — продольные салазки; 11 — консоль; 12 — поворотная планшайба; 13 — шпиндель

ны поперечные Т-образные пазы для установки заготовки или рабочих приспособлений.

На рис. 6.46, б представлены основные узлы **вертикально-фрезерного** станка. Эти станки имеют много общих унифицированных узлов и деталей с горизонтально-фрезерными станками, но отличаются от последних вертикальным расположением шпинделя, который можно поворачивать под углом до 45° в обе стороны. На фундаментной плите 1 установлена чугунная станина 2, внутри которой расположены отсек для электрооборудования и коробка скоростей 3. В верхней части станины установлена поворотная планшайба 12 с фрезерной головкой и шпинделем 13. С помощью винтового домкрата по вертикальным направляющим станины перемещается консоль 11 с продольными 10 и поперечными 6 салазками и столом.

Обработку сложных фасонных поверхностей производят концевыми фрезами на **копировально-фрезерных** станках. Плоские фасонные поверхности замкнутого контура с прямолинейной образующей получают контурным фрезерованием. При этом заготовке или фрезе одновременно сообщают движение в двух направлениях (продольное и поперечное движения подачи). Одно из движений является задающим (постоянным), другое — следящим, зависящим от формы копира. Профиль обработанной поверхности зависит от соотношения этих движений. Скорость перемещения фрезы относительно заготовки (результатирующая подача) должна совпадать со скоростью перемещения следящего элемента (щупа) по копиру. Объемные фасонные поверхности получают объемным копирным фрезерованием. Поверхности фрезеруют отдельными вертикальными или горизонтальными фасонными строчками. Ширина строчки соответствует диаметру концевой фрезы. После фрезерования одной строчки по принципу контурного фрезерования фрезу перемещают на ширину строчки. Следующую строчку фрезеруют на обратной подаче.

В современных копировальных станках применяются механические, электромеханические или гидравлические следящие приводы. При использовании механического следящего привода щуп жестко связан с фрезой, сила резания воспринимается копиром, что является причиной его быстрого изнашивания. Применение электромеханических или гидравлических усилителей позволяют уменьшить давление на щуп. Малые давления щупа на копир позволяют фрезеровать крутые профили, обеспечивая высокую точность обработки. На рис. 6.47, а показан общий вид копировально-фрезерного станка. На фундаментной плите 12 установлена стани-

на 1, по горизонтальным направляющим которой перемещаются продольные салазки 2. По поперечным направляющим салазок перемещается стол 3. На столе установлена стойка 4 с вертикальным столом 5, в пазах которого — приспособление с обрабатываемой заготовкой и копир. На правой части стола установлена вертикальная стойка 11 с винтовым механизмом подачи 9. По направляющим стойки перемещаются фрезерная бабка 10 с шпинделем 6 и следящий привод 8 с щупом 7.

В крупносерийном и массовом производстве для высокопроизводительного непрерывного фрезерования партии деталей применяют фрезерные станки непрерывного действия. Для обработки заготовок небольшого размера (некрутые валы, рычаги, кронштейны и др.) — карусельно-фрезерные станки, более крупные заготовки обрабатывают на барабанно-фрезерных станках.

Основные узлы **карусельно-фрезерного** станка представлены на рис. 6.47, б. На станине 1 смонтирована стойка 4, по вертикальным направляющим которой перемещается фрезерная головка 10 с двумя шпинделями 6. Оба шпинделя имеют общий привод, но могут настраиваться на различную частоту вращения. Обычно левый шпиндель настроен на черновое фрезерование поверхности, правый — на чистовое. На круглом столе 13 (карусели) с вертикальной осью вращения в приспособлениях устанавливают заготовки. Стол установлен в салазках 2, которые могут перемещаться по направляющим станины. При работе станка стол вращается непрерывно.

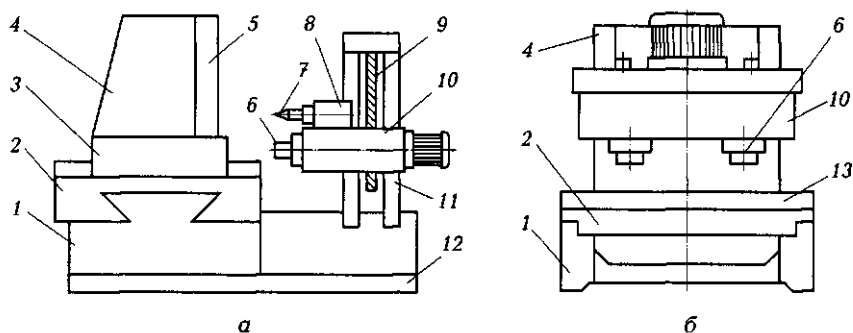


Рис. 6.47. Специальные фрезерные станки:

а — копировально-фрезерный; б — карусельно-фрезерный; 1 — станина; 2 — продольные салазки; 3 — стол; 4 и 11 — стойки; 5 — вертикальный стол; 6 — шпиндель; 7 — щуп; 8 — следящий привод; 9 — механизм подачи; 10 — фрезерная головка (бабка); 12 — фундаментная плита; 13 — карусель

Особенностью **барabanно-фрезерных** станков является наличие горизонтального барабана. На гранях барабана установлены приспособления, в которых базируются и зажимаются заготовки. Медленным вращением барабана заготовкам придают круговую подачу. Станки оснащены несколькими фрезерными головками.

6.8.6. Технологическая оснастка, применяемая при фрезеровании

Для закрепления режущего инструмента применяются различные оправки. На рис. 6.48, *а* показана короткая оправка для закрепления торцевых и дисковых фрез. Оправка 3 устанавливается в коническое отверстие шпинделя 2 и зажимается винтом 1. Фреза 5 устанавливается на цилиндрической поверхности оправки и зажимается гайкой 6. Крутящий момент передается с помощью призматической шпонки 4.

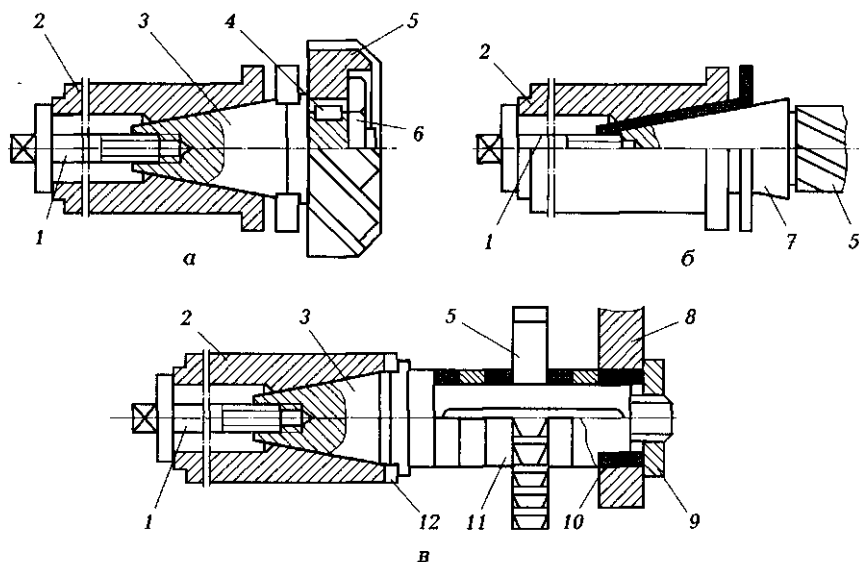


Рис. 6.48. Оправки к фрезерным станкам:

а — для торцевых фрез; *б* — для концевых фрез; *в* — для цилиндрических фрез;
 1 — винт; 2 — шпиндель; 3 — оправка; 4 — шпонка; 5 — фреза; 6 и 9 — гайки;
 7 — коническая втулка; 8 — серьга; 10 — подшипник; 11 — цилиндрическая втулка;
 12 — сухарь

Для установки концевых фрез применяются оправки, показанные на рис. 6.48, б. Фреза 5 с помощью переходных конических втулок 7 устанавливается в шпинделе 2 и зажимается винтом 1.

На горизонтально-фрезерных станках фрезы устанавливаются на длинных оправках с коническим хвостовиком (рис. 6.48, в). Оправка 3 устанавливается коническим хвостовиком в отверстие шпинделя 2 и зажимается винтом 1. Цилиндрический конец оправки через подшипник 10 устанавливается в серье 8 и зажимается гайкой 9. Фреза 5 устанавливается на цилиндрической поверхности оправки. Ее осевое положение определяется втулками 11. Крутящий момент фрезе передается за счет сил трения или с помощью призматической шпонки. Крутящий момент от шпинделя к оправке передается сухарями 12. Для установки, базирования и закрепления заготовок применяются универсальные приспособления (прихваты, угольники, призмы, машинные тиски и др.). При обработке большой партии заготовок проектируются и изготавливаются специальные приспособления.

Для периодического точного поворота заготовки на заданный угол (деление заготовки) применяют механические или оптические делительные головки. *Механическая делительная головка* показана на рис. 6.49, а. Головка состоит из корпуса 1, поворотного барабана 3 и шпинделя с центром 6. В корпусе головки размещен червячный редуктор (передаточное отношение обычно 1/40). Вращение шпинделю придают рукояткой 2 с фиксатором. Передний конец шпинделя — резьбовой, для установки вместо центра кулачкового патрона или поводка 7. Делительный диск 4 установлен на полом валу соосно с валом рукоятки 2. Для удобства отсчета делений имеется раздвижной сектор 8, который состоит из двух ножек, устанавливаемых таким образом, чтобы между ними располагалось нужное число отверстий делительного диска. На шпинделе установлен лимб 5 для непосредственного деления заготовки на части.

Универсальная делительная головка позволяет делить заготовку тремя способами: непосредственным, простым и дифференциальным.

При *непосредственном делении* отсоединяют делительный диск от червячной передачи. Рукояткой 2 поворачивают шпиндель на заданный угол, отмечая его по шкале лимба. Данный способ деления имеет невысокую угловую точность, но удобен при углах 20; 30; 45; 90 и 180°.

Простое деление осуществляется с помощью делительного диска. На концентрических окружностях торца диска с точным угловым шагом выполнены сквозные отверстия. Количество отверстий в

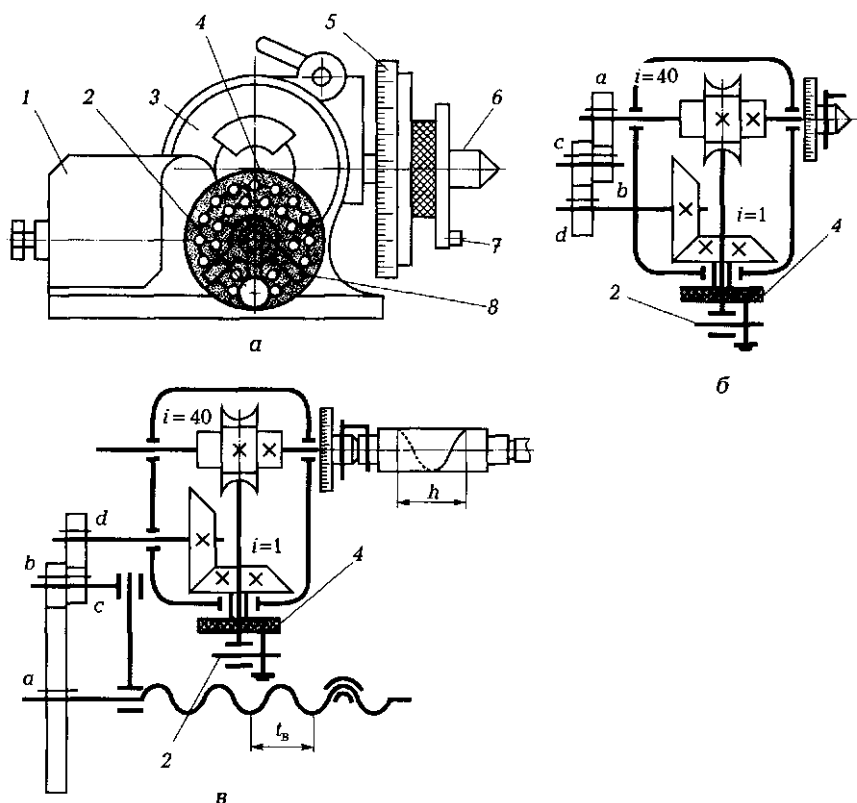


Рис. 6.49. Универсальная механическая делительная головка:

a — компоновка головки; *б* — дифференциальное деление; *в* — настройка головки для фрезерования винтовых поверхностей; 1 — корпус; 2 — рукоятка; 3 — поворотный барабан; 4 — делительный диск; 5 — лимб; 6 — центр; 7 — поводок; 8 — раздвижной сектор; *a*, *b*, *c*, *d* — сменные колеса; *h* — шаг нарезаемой винтовой канавки; t_n — шаг ходового винта

каждом концентрическом ряду отмечено соответствующим числом. Шпиндель с заготовкой поворачивают вращением рукоятки через включенную червячную передачу. Частота вращения рукоятки n , необходимая для поворота заготовки на $1/z$ часть оборота, равна

$$n = N/z = 40/z = A + a/b = A + ma/mb,$$

где N — характеристика делительной головки, величина, обратная передаточному отношению червячной пары, $N = 40$; z — число частей, на которое нужно разделить заготовку; A — целое число необходимых оборотов рукоятки; mb — число отверстий на одном из

концентрических рядов делительного диска; $та$ — число отверстий, на которое необходимо дополнительно повернуть рукоятку (для удобства отсчета $та$ ножки раздвижного сектора раздвигают на эту величину).

Например, необходимо разделить заготовку на 17 частей: $n = 40/17 = 2 + 6/17$. На делительном диске есть ряд с 34 отверстиями, поэтому $n = 2 + 12/34$. Раздвигаем ножки сектора на 12 отверстий ряда «34». Устанавливаем фиксатор на ряд «34». Вводим фиксатор в одно из отверстий и поворачиваем делительный диск на два оборота. Далее поворачиваем диск на угловой шаг, равный шагу между ножками. Деление произведено.

Дифференциальное деление применяется, если на делительном диске нет нужного ряда отверстий. При дифференциальном делении (рис. 6.49, б) заготовку поворачивают на требуемый угол вращением рукоятки 2 относительно вращающегося делительного диска 4. Дополнительное вращение шпинделя осуществляется за счет конической передачи (передаточное отношение $i = 1$) и сменных колес a, b, c, d .

Частота вращения рукоятки, необходимая для поворота заготовки,

$$n = 40/z = n_1 + n_2 = 40/z_{\text{пр}} + i_{\text{см}}/z; i_{\text{см}} = 40(z_{\text{пр}} - z)/z_{\text{пр}},$$

где n_1 — частота вращения рукоятки относительно делительного диска; n_2 — частота вращения делительного диска, соответствующая повороту заготовки на $1/z$ делений; z — заданное число делений; $z_{\text{пр}}$ — число отверстий в делительном диске, приблизительно равное заданному числу делений; $i_{\text{см}}$ — передаточное отношение сменных зубчатых колес.

Если $z_{\text{пр}} > z$, передаточное отношение $i_{\text{см}}$ положительное, вращение рукоятки и делительного диска совпадает. При $z_{\text{пр}} < z$ передаточное отношение $i_{\text{см}}$ отрицательное, вращение рукоятки и делительного диска не совпадает.

Фрезерование винтовых поверхностей с помощью делительной головки осуществляют при непрерывном вращении шпинделя делительной головки, которое она получает от винта продольной подачи фрезерного станка через сменные колеса a, b, c, d (рис. 6.49, в). При перемещении заготовки на шаг нарезаемой винтовой поверхности делительная головка должна повернуться на один оборот. Передаточное отношение сменных зубчатых колес будет равно

$$i_{\text{см}} = (z_a z_c)/(z_b z_d) = 40t_{\text{в}}/h,$$

где z_a, z_b, z_c, z_d — число зубьев колес a, b, c, d соответственно; t_b — шаг ходового винта продольной подачи; h — шаг нарезаемой винтовой поверхности.

Стол станка с заготовкой поворачивают на угол наклона винтовой канавки, равный $\arctg(\pi D_3/h)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое главное движение?
2. Что такое движение подачи?
3. Что такое подача на оборот?
4. Как определяются главные передний и задний углы резания?
5. К какому виду относятся данные инструментальные материалы и каков их химический состав: сталь У10, сталь Р6М5К5, ВК100М, Т5К10, ТТ30К4?
6. Что такое размерная стойкость инструмента?
7. Что такое шероховатость поверхности?
8. Расшифруйте марку станка 1К62.
9. Как рассчитать передаточное отношение червячной передачи?
10. Что такое растачивание?
11. Как можно обточить короткую коническую поверхность?
12. Какие заготовки обрабатывают на токарных карусельных станках?
13. Почему при строгании используют изогнутые резцы?
14. Какие поверхности обрабатывают долблением?
15. Какие схемы срезания припуска при протягивании вы знаете?
16. Как определить глубину резания при сверлении и рассверливании?
17. Сколько режущих кромок имеет двузубое спиральное сверло?
18. Какими сверлами обрабатывают глубокие отверстия?
19. Какой диаметр развертки является истинным?
20. Почему при сверлении назначают скорости резания меньше, чем при точении?
21. При обработке каких заготовок применяют радиально-сверлильные станки?
22. Как установить расточный резец относительно центров токарного станка?
23. Чем отличается полутное фрезерование от встречного?
24. Какие фрезы применяются для фрезерования различных канавок?
25. На каких станках производят фрезерование сложных фасонных поверхностей?
26. Как производят дифференциальное деление заготовки на универсальной делительной головке?

АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шлифование — процесс обработки заготовок резанием абразивным инструментом (крутами, брусками, абразивным инструментом на гибкой основе, свободным абразивом). Абразивные зерна расположены в крутах беспорядочно и удерживаются связующим материалом. При вращении крута в зоне его контакта с обрабатываемой поверхностью часть зерен срезает материал заготовки. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микроследов воздействия абразивных зерен, поэтому иногда шлифование определяют как управляемое изнашивание заготовки. Скорость резания при шлифовании — 30...100 м/с. Шлифование — высокопроизводительный процесс, посредством его можно производить чистовую обработку заготовок из различных материалов, имеющих различную твердость (для заготовок из закаленных сталей — это основной способ обработки).

7.1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Абразивный инструмент, в отличие от другого многозубого лезвийного инструмента, имеет множество режущих микролезвий, расположенных хаотично. Единичное зерно шлифовального крута может располагаться на некотором расстоянии от обрабатываемой поверхности, скользить по обработанной поверхности (скользящие зерна), проникать в обработанную поверхность на небольшую глубину и только пластически деформировать материал заготовки (деформирующие зерна), проникать в обработанную поверхность на глубину, достаточную для снятия стружки (режущие зерна). По сравнению с лезвийной обработкой скользящие зерна создают дополнительное сопротивление резанию (дополнительное

трение), деформирующие зерна создают дополнительное сопротивление резанию на упругую и пластическую деформацию поверхностного слоя. Режущие зерна также расположены хаотично (углы резания неоптимальные, например значения переднего угла от -90 до $+30^\circ$), что приводит к увеличению сил сопротивления резанию. Сила резания при работе единичного зерна значительно больше, но абразивный инструмент снимает тонкие стружки, поэтому суммарная сила резания меньше. Температура в зоне резания значительно выше, и возможны структурные превращения металла (прижоги). Стружка сгорает на воздухе в виде снопа искр, что требует дополнительных мер пожарной и санитарной безопасности.

Сила и мощность резания. Силу резания, как и при лезвийной обработке, можно разложить на три составляющие. Тангенциальная сила (главная сила резания) P_z направлена вдоль вектора главного движения, радиальная сила P_y направлена по нормали к обработанной поверхности, осевая сила резания P_x — против вектора движения подачи. Силу и мощность резания рассчитывают по известным формулам:

$$P_z = C_{pz} v_3^a S_{\text{прод}}^b t^c; N_k = P_z v_k / (1\,000 \eta_k); N_3 = P_z v_3 / (60 \cdot 1\,000 \eta_3),$$

где коэффициент C_{pz} и показатели степени a, b, c зависят от условия шлифования; $S_{\text{прод}}$ — продольная подача на оборот круга, мм/об; v_k — скорость круга, м/с; v_3 — скорость заготовки, м/с, при круглом шлифовании скорость заготовки равна круговой подаче заготовки или круга, при плоском шлифовании скорость заготовки равна продольной подаче заготовки; t — глубина резания, мм; η_k, η_3 — КПД кинематических цепей вращения круга и заготовки соответственно.

Износ, стойкость и правка кругов. В процессе шлифования режущие свойства круга изменяются. Абразивные зерна затупляются, частично раскалываются, выкрашиваются, поры между зернами забиваются отходами шлифования (круг «засаливается»), поверхность круга теряет свою первоначальную форму. Возрастают сила и температура резания, снижается точность обработки, увеличивается вероятность прижогов. Однако при выламывании затупившихся зерен на поверхности круга обнажаются новые, незатупившиеся зерна, т.е. круг частично самозатачивается. В этом смысле очень важна роль связки (вещества, закрепляющего зерна) и так называемой твердости круга. При слабом закреплении зерна быстрее выламываются, круг лучше самозатачивается, но его рабочая поверхность быстро теряет свою форму, что удобно

при черновом шлифовании. При чрезмерном закреплении зерен круг быстро теряет свои режущие свойства, но его рабочая поверхность хорошо сохраняется, что удобно при чистовом шлифовании.

Для восстановления геометрии круга и его режущих свойств проводят правку круга. Алмазным или абразивным инструментом снимают часть рабочей поверхности круга, толщина удаляемого слоя обычно не превышает 0,01...0,03 мм.

Геометрическая стойкость шлифовального круга — время (количество обработанных заготовок) непрерывной работы, после которой необходима правка с целью восстановления геометрических параметров рабочей поверхности. Геометрическую стойкость обычно назначают для чистового шлифования, для шлифования фасонных или конических поверхностей.

Физическая стойкость шлифовального круга — время (количество обработанных заготовок) непрерывной работы, после которой необходима правка с целью восстановления режущих свойств рабочей поверхности. Физическую стойкость обычно назначают для черного шлифования.

Испытания и балансировка кругов. Если установить на станок шлифовальный круг с трещинами или с превышением допустимой для него скорости резания, при работе его разорвет. Поэтому предприятие-изготовитель испытывает каждый выпущенный круг на наличие трещин и микротрещин. Круги диаметром более 150 мм испытывают на специальных станках вращением со скоростью, в 1,5 раза превышающей рабочую скорость данного круга.

Рабочую скорость обязательно указывают на торце круга. Запрещено хранить круги навалом. При хранении кругов желательно между ними проложить картонную прокладку. Перед установкой круга на станок его необходимо проверить на наличие трещин. Визуальная проверка покажет наличие больших трещин. Лучше провести проверку на звук: круг подвешивают на нити и деревянным молотком простукивают. Дребезжащий звук означает наличие микротрещин, круг должен быть забракован. При установке круга на оправку недопустим непосредственный контакт металлических торцов оправки и круга — обязательно картонные прокладки.

При шлифовании возникают автоколебания, вызванные неуравновешенностью шпинделя, электродвигателя, кинематических передач и других частей шлифовального станка. Однако наибольшие колебания возникают при неуравновешенности самого шлифовального круга. Эти колебания опасны тем, что воз-

растают напряжения в круге — его может разорвать. Колебания значительно ухудшают качество обработки, возрастает вероятность прижогов, увеличивается износ круга и станка. Предприятия-изготовители и предприятия крупносерийного производства испытывают шлифовальные круги на специальных балансировочных машинах. Выявленный дисбаланс исправляют, заливая свинец на необходимые участки круга. В единичном и среднесерийном производстве перед установкой кругов диаметром более 80 мм их вместе с планшайбой балансируют вручную (статическая балансировка).

7.2. АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Абразивные материалы (АМ) — измельченные синтетические или естественные обогащенные минералы, твердость которых превышает твердость обрабатываемого материала. Они применяются для механической (абразивной) обработки (шлифование, полирование, хонингование, суперфиниширование и др.) любых конструкционных материалов.

В качестве АМ используют минералы естественного и искусственного происхождения: условно «мягкие» — крокус, оксид хрома, бой стекла, тальк и др.; условно «твердые» — электрокорунды, карбид кремния, корунды, кремний, гранат и др.; сверхтвердые — алмаз, кубический карбид или нитрид бора.

Основными характеристиками АМ, влияющими на их технологические свойства, являются форма и состояние поверхности абразивных зерен, их твердость, механическая и химическая стойкость, абразивная способность.

Абразивное зерно (АЗ) — кристаллический осколок (кристаллит), монокристалл или агрегат, состоящий из множества мелких кристаллов (поликристалл). Зерно может иметь приблизительно равные размеры по высоте, ширине и толщине (изометрическая форма) или обладать мечевидной и пластинчатой формой, что определяется родом абразивного материала и степенью измельчения исходного зерна. Для механической обработки наиболее выгодна изометрическая или близкая к ней форма, а наименее выгодная — мечевидная. Состояние поверхности влияет на режущие свойства АЗ. Зерно с острыми углами значительно легче проникает в обрабатываемый материал. АЗ — поликристаллы, неплотные по структуре, выдерживают меньшие усилия резания и быстрее разрушаются.

Твердость абразивных материалов определяют либо по шкале Мооса (наиболее твердый материал — алмаз имеет твердость, равную 10 единицам, наименее твердый — тальк, его твердость составляет 1 единицу), либо методом вдавливания алмазной пирамиды в поверхность испытуемого материала.

Под **механической стойкостью** понимают способность АМ выдерживать механические нагрузки и не разрушаться при механической обработке конструкционных материалов. Механическая стойкость АМ характеризуется пределом прочности при сжатии, который определяют раздавливая зерно абразивного материала и фиксируя нагрузку в момент его разрушения.

Под **химической стойкостью** понимают способность АМ не изменять своих механических свойств в растворах щелочей и кислот, а также в воде и органических растворителях. Химическая стойкость необходима АМ, так как при механической обработке они часто используются в виде суспензий микропорошков в различных растворах, а при шлифовании применяются химически активные смазочно-охлаждающие жидкости.

Под абразивной способностью понимают возможность одного материала обрабатывать другой или группу различных материалов. Абразивная способность характеризуется массой снимаемого при шлифовании материала до затупления зерен либо определяется количеством сошлифованного за определенное время материала. Для определения абразивной способности исследуемый материал помещают между двумя металлическими или стеклянными дисками, которые вращаются в противоположных направлениях. По количеству съема металла или стекол с поверхности дисков за определенный промежуток времени судят об абразивной способности исследуемого материала. Чаще всего за эталон абразивной способности принимают алмаз (абразивная стойкость равна единице).

Электрокорунг — искусственный абразивный материал, состоящий, в основном, из корунда (Al_2O_3) изготовленного в электрических печах из высокоглиноземистого сырья. В зависимости от состава примесей различают электрокорунд белый, нормальный и с присадкой хрома (электрокорунд хромистый), с присадкой титана (электрокорунд титанистый) и др.

Нормальный электрокорунг содержит 92...95 % корунда, шлак и ферросплавы. Марки (по ГОСТ 28818 — 90*): 13А (применяется для абразивного инструмента на органической связке); 14А (для абразивного инструмента на органической и керамической связках) и 15А (для абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного класса).

Белый электрокорунд содержит 98 ... 99 % корунда и алюминат натрия. Марки: 23А и 24А (применяются для шлифовальных кругов, абразивной шкурки, обработки свободным зерном), 25А (для абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного класса).

Хромистый электрокорунд получают в дуговых печах плавкой глинозема с добавкой оксида хрома. Абразив имеет повышенную механическую прочность и абразивную способность. Марки: 33А (применяют для абразивного инструмента на керамической связке, абразивной шкурки, обработки свободным зерном) и 34А (для абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного класса, абразивной шкурки, обработки свободным зерном).

Титанистый электрокорунд марки 37А применяют для инструментов на керамической связке при обработке сталей.

Цирконистый электрокорунд марки 38А используют в инструментах для обдирочного шлифования и шлифования с высокими скоростями.

Монокорунд марок 43А и 44А предназначен для абразивного инструмента на керамических связках, а 45А — для абразивного прецизионного инструмента. Корунд марки 92Е используют для полирования деталей из стекла и металлов.

Карбид кремния — химическое соединение кремния с углеродом. *Черный карбид кремния* марок (по ГОСТ 26327—84*) 53С, 54С и 55С применяется для шлифования твердых сплавов, чугуна, цветных металлов, стекла, пластмасс. *Зеленый карбид кремния* марок 63С и 64С применяется для тонкого шлифования металло-режущего инструмента, твердых сплавов, керамики и правки шлифовальных кругов.

Карбид бора — черные кристаллы B_4C ($B_{12}C_3$). Этот АМ является одним из самых химически стойких веществ. Температура разложения более 2450 °С, плотность 2,52 г/см³, теплопроводность 121 Вт/(м·К) при температуре 300 К, микротвердость 49,1 ГПа, модуль упругости 450 ГПа. На воздухе не окисляется при температуре до 600 °С. Не растворяется в воде, концентрированных кислотах. Чаще всего применяется для доводочных операций.

Алмаз природный — кристаллическая модификация углерода. Самый твердый из известных природных материалов (твердость 100 000 ... 92 000 МПа), обладает низкой теплопроводностью, высокой износостойкостью и низким коэффициентом линейного расширения. Марки: А8 (применяется для бурового и правящих инструментов), А5 (для абразивных инструментов на металлической

связке, для дисковых пил), АЗ (для абразивных инструментов на металлической связке), А1 и А2 (для шлифования стекла, керамики и бетона), АМ (для полирования деталей из закаленных сталей, стекла), АМ5 — для сверхтонкой доводки и полирования.

Алмаз синтетический обладает меньшим разбросом твердости, чем природный алмаз (95 000...93 000 МПа). Марки: АСО2 и АСП2 (применяются для инструментов на органических связках при чистовой обработке и доводке сталей и твердых сплавов); АСО4 (алмаз синтетический обыкновенной прочности); АСП4 (алмаз синтетический повышенной прочности) — для обработки керамики и других хрупких материалов; АС6 и АСП6 (для работы на повышенных нагрузках); АСО15, АСП15 и АСВ15 — алмазы синтетические высокой прочности (для работы в тяжелых условия при резке стекла, шлифовании керамики и железобетона), АСО20, АСП20, АСВ20 и АСО32 (при бурении, хонинговании и правке шлифовальных кругов); АРВ1 (для хонингования чугунов, резки стеклопластика), АСМ (для доводки и полирования закаленных сталей и твердых сплавов), АСМ5 и АСМ1 (для сверхтонкой доводки).

Кубический нитрид бора (КНБ) синтезирован из нитрида бора (BN), упакованного в гексагональную решетку. Материал характеризуется уникальной комбинацией физико-механических и химических свойств.

Расположение атомов в кристаллической решетке кубического нитрида бора принадлежит к структурному типу кубический, который определяет высокую плотность и твердость кристаллов КНБ (рис. 7.1).

Модуль упругости КНБ, равный 706 ГПа, значительно больше, чем у обычных абразивных материалов (модуль упругости 296...365 ГПа). Коэффициент линейного теплового расширения КНБ бора в 1,5—3 раза ниже, чем у электрокорунда. Его кристаллы не теряют своих свойств, фазовую структуру и прочность до температуры 1 100...1 200 °С. Более того, при повышении температуры от активного окисления прочность зерна растет, так как зерна овалозированы и появляющийся на них слой борного ангидрида B_2O_3 цементирует дефекты поверхности. Формирование B_2O_3 слоя препятствует диффузии кислорода. КНБ химически пассивен при взаимодействии с металлами. Марки КНБ (ГОСТ Р 53922—2010): ЛО и ЛП применяются для изготовления абразивного инструмента на органической, керамической и металлической связках, абразивных паст и шкурок; КР, КО и КОС — для изготовления шлифовальных порошков.

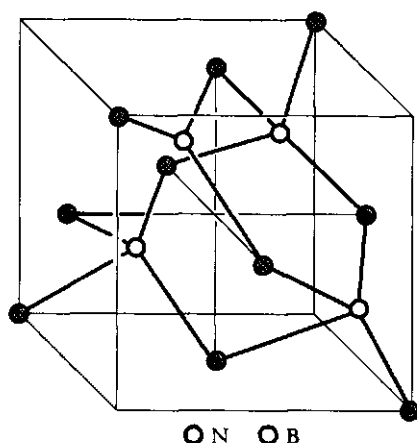


Рис. 7.1 Расположение атомов бора и азота в решетке КНБ

Основные характеристики абразивных материалов приведены в табл. 7.1.

Зернистость абразивных материалов. Для изготовления абразивного инструмента используют различные по размеру абразивные материалы. В соответствии с ГОСТ 21445—84* и ГОСТ Р 52381—2005 размер абразивных зерен двумя показателями: зерновым составом и зернистостью. Зерновой состав — распределение абразивных зерен по размерам, выраженное в массовых долях и определяемое путем рассева шлифовальных порошков на контрольных ситах. **Зернистость** — условная числовая характеристика зернового состава шлифовальных порошков.

Шлифовальные порошки изготавливают зернистостью F4—F220. Буква *F* означает, что обозначение зернистости соответствует стандарту FEPA (Европейская ассоциация производителей абразивов) и ISO 8486—2005.

На российских предприятиях используется устаревший ГОСТ 3647—80*, по которому зернистость соответствует размеру ячейки сита в сотых долях миллиметра для шлифовального зерна (диаметр зерна 2000...160 мкм) и в микрометрах для шлифовального порошка (зерна диаметром 125...3 мкм). В табл. 7.2 приведены данные по соответствию зернистости ГОСТ Р 52381—2005 и ГОСТ 3647—80* для порошков из электрокорунда и карбида кремния — а в табл. 7.3 — данные по соответствию зернистости ГОСТ 9206—80*, ГОСТ Р 53922—2000 и международным стандартам для сверхтвердых абразивных материалов.

Таблица 7.1. Основные характеристики абразивных материалов

Абразивный материал	Микротвердость, 10^3 МПа	Абразивная способность	Теплостойкость, °С
Электрокорунд:			
■ нормальный	19 ... 20	0,14 ... 0,145	1 250 ... 1 300
■ белый	20 ... 21	0,14 ... 0,155	1 700 ... 1 800
■ хромистый	20 ... 22	0,1 ... 0,11	
■ титанистый	20 ... 22	0,1 ... 0,112	1 250 ... 1 300
■ циркониевый	23 ... 24	0,15 ... 0,2	1 900 ... 2 000
Монокорунд	23 ... 24	0,15 ... 0,25	1 900 ... 2 000
Сфорокорунд	20 ... 21	0,13 ... 0,14	1 300 ... 1 400
Карбид кремния:			
■ зеленый	33 ... 36	0,4 ... 0,45	1 300 ... 1 400
■ черный	33 ... 36	0,3 ... 0,4	1 300 ... 1 400
Карбид бора	40 ... 45	0,5 ... 0,6	700 ... 800
Кубический нитрид бора	80 ... 100	0,58 ... 0,64	1 100 ... 1 200
Алмаз:			
■ природный	53 ... 96	0,9 ... 0,95	1 400 ... 1 500
■ синтетический	86 ... 100	1	600 ... 700

Таблица 7.2. Соответствие обозначений зернистости по ГОСТ Р 52381—2005 и ГОСТ 3647—80

ГОСТ Р 52381—2005	ГОСТ 3647—80	ГОСТ Р 52381—2005	ГОСТ 3647—80	ГОСТ Р 52381—2005	ГОСТ 3647—80	ГОСТ Р 52381—2005	ГОСТ 3647—80
F4	—	F14	—	F40	—	F100	12
F5	—	F16	125	F46	40	F120	10
F6	—	F20	100	F54	32	F150	8
F7	—	F22	—	F60	25	F180	6
F8	—	F24	80	F70	20	F220	5

ГОСТ Р 52381— 2005	ГОСТ 3647— 80	ГОСТ Р 52381— 2005	ГОСТ 3647— 80	ГОСТ Р 52381— 2005	ГОСТ 3647— 80	ГОСТ Р 52381— 2005	ГОСТ 3647— 80
F10	200	F30	63	F80	—	—	—
F12	160	F36	50	F90	16	—	—

Таблица 7.3. Соответствие обозначений зернистости по ГОСТ 9206—80*, ГОСТ Р 53922—2000 и международным стандартам для сверхтвердых абразивных материалов, мкм

ГОСТ 9206—80*, мкм	ГОСТ Р 53922— 2000, мкм	FEPA		Standard	
		Алмаз	КНБ (CBN)	US (ACTME-11) ISO 6106—2005, мкм	
250/200	251	D251	B251	60/80	251/212
200/160	213, 181	D181	B181	80/100	212/150
160/125	151	D151	B151	100/120	150/125
125/100	126	D126	B126	120/140	125/106
100/80	107, 91	D107, D91	B107, B91	140/200	106/75
80/63	76	D76	B76	200/230	75/63
63/50	64	D64	B64	230/270	63/53
50/40	54, 46	D54, D46	B54, B46	270/325	53/45

Связка абразивных инструментов. Вещество или совокупность веществ, применяемых для закрепления шлифовальных зерен и наполнителя, называется связкой. Связка влияет на геометрию рельефа рабочей поверхности круга, его износ, параметры шероховатости обработанной поверхности.

Керамические связки (K1, K2, K3, K4, K5, K6, K8, K10) — для всех основных видов шлифования, кроме прорезки узких пазов, обдирочных работ: K2, K3 — для инструмента из карбида кремния; K2 — для мелкозернистого инструмента; K1, K5, K8 — для инструмента из электрокорунда; K1 — для шлифования и заточки алмазным кругом твердосплавного режущего инструмента совместно со стальной державкой или корпусом.

Бакелитовые связки (Б, Б1, Б2, Б3, Б4, Б156, БП2, БУ) — при изготовлении кругов с упрочненными элементами для шлифования

при скоростях 60... 100 м/с, для обдирочного шлифования, плоского шлифования торцом круга, для отрезки, прорезки пазов, заточки режущих инструментов, шлифования прерывистых поверхностей, при изготовлении мелкозернистых кругов для отделочного шлифования, алмазных и эльборовых кругов, хониговальных брусков.

Вулканитовая, глифталевая, поливинилформалевая связи (В, В1, В2, В3, В5, ГФ, ПФ, Э5, Э6) — при изготовлении ведущих кругов для бесцентрового шлифования, гибких кругов для полирования и отделки (В5), кругов для отрезки, прорезки и шлифования пазов, для профильного шлифования.

Металлические связи — при изготовлении алмазных кругов повышенной износостойкости для обработки твердых сплавов, кругов для электрохимической абразивной обработки.

Органические связи с металлическим наполнителем (Б156, БП2, ТО) — при изготовлении алмазных кругов для заточки твердосплавного режущего инструмента, для шлифования твердосплавных или керамических деталей, профильного шлифования.

Органические связи с минеральным наполнителем (Б1, О1) — при изготовлении алмазных кругов для чистовой заточки твердосплавного режущего инструмента, чистового шлифования твердосплавных деталей.

Твердость абразивного инструмента. Величина, характеризующая свойство инструмента сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой при сохранении его характеристик в пределах установленных норм, называется твердостью абразивного инструмента. Принята следующая шкала твердостей: ВМ1, ВМ2 — весьма мягкие; М1, М2, М3 — мягкие; СМ1, СМ2 — среднемягкие; С1, С2 — средние; СТ1, СТ2, СТ3 — среднетвердые; Т1, Т2 — твердые; ВТ — весьма твердые; ЧТ — чрезвычайно твердые.

Мягкие и среднемягкие круги (М2—СМ2) используют для плоского шлифования кругами на бакелитовой основе, шлифования периферией керамическими кругами, шлифования деталей из твердых сплавов, закаленных сталей, цветных металлов и их сплавов. Среднемягкие и средние связи (СМ2—С2) применяют для чистового шлифования, шлифования резьбы с крупным шагом. Средние и среднетвердые круги (С2—СТ2) используют для шлифования и резьбошлифования заготовок из незакаленных сталей, чугуна, вязких материалов, хонингования. Среднетвердые и твердые круги (СТ2—Т2) применяют для шлифования обдирочного,

предварительного и бесцентрового шлифования профильных и прерывистых поверхностей, заготовок малого диаметра, хонингования закаленных деталей. Весьма твердые и чрезвычайно твердые круги (ВТ, ЧТ) используют для шлифования шариков подшипников, правки шлифовальных кругов.

Структура абразивного инструмента. Она определяет соотношение объемов шлифовального материала, связки и пор. Различают 16 номеров структур. Абразивные инструменты зернистостью 125—80 изготавливают структурой № 3 и 4, зернистостью 50—40 — № 5 и 6, зернистостью 25—12 — № 6 и 7. Крути высоких номеров структур изготавливают высокопористыми. Пores и капилляры сообщаются между собой за счет использования выгорающих парообразователей. В характеристике таких кругов обязательно указывается парообразователь.

Абразивный инструмент на гибкой основе. Такой инструмент с нанесенным на нем слоем (слоями) абразива, закрепленного связкой, называют *шлифовальной шкуркой*.

Шлифовальные шкурки выпускают на бумажной, тканевой, комбинированной, фибровой и других основах. В зависимости от вида основы и свойств связки различают шкурку водостойкую, неводостойкую, термостойкую и др. В зависимости от числа слоев шлифовального материала, нанесенных на шкурку, различают одно- и двухслойную шкурку. Если шлифовальный слой нанесен на обеих сторонах основы, шкурка называется двусторонней.

Существуют:

- **шлифовальный лист** — полоса прямоугольной формы длиной до 1 000 мм шириной 70...1 000 мм;
- **шлифовальная лента** — полоса прямоугольной формы, ширина которой значительно меньше ее длины (шлифовальную ленту с замкнутым контуром называют бесконечной шлифовальной лентой), несклеенная лента выпускается в бобинах, размеры: длина 25...100 м, ширина 2,5...1 500 мм;
- **шлифовальный диск** — шкурка в форме круга (диски могут иметь радиальные прорези);
- **шлифовальная трубка** — шкурка в форме цилиндра (если диаметр трубки равен или больше ее высоты, ее называют шлифовальным кольцом);
- **шлифовальный конус** (тип К) или усеченный конус (тип КУ) — шкурка в виде соответствующей геометрической фигуры;
- **лепестковый шлифовальный круг** — радиально расположенные и закрепленные одной стороной шлифовальные листы.

Шлифовальные круги. Типаж и размеры шлифовальных кругов зависят от размеров и конфигурации обрабатываемой заготовки, требований к результатам обработки, вида обработки и характеристик станка.

Основные типы шлифовальных кругов приведены в табл. 7.4, а шлифовальных головок — в табл. 7.5.

Круги прямого профиля (тип 1) — наиболее распространенная форма. Кольцевые круги (тип 2) применяются для плоского шлифования торцом круга, крепятся на планшайбе с помощью цементирующих веществ. Круги с коническим профилем (типы 3 и 4), круги с выточками (типы 5, 7, 10, 23) имеют универсальное применение. Благодаря выточкам имеется лучший доступ круга при подводе к обрабатываемой поверхности, возможность одновременной обработки цилиндрической и торцевой поверхностей, обработки буртиков, фланцев и др. Чашечные круги (тип 6)

Таблица 7.4. Основные формы шлифовальных кругов



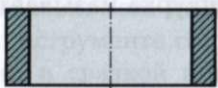







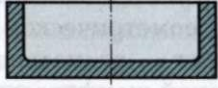







Тип	Форма	Тип	Форма
1		7	
2		10	
3		11	
4		14	
5		23	
6		36	

Таблица 7.5. Основные формы шлифовальных головок

Тип	Форма	Тип	Форма
AW		FW	
DW		KW	
EW		F2W	

используют для заточки и доводки режущего инструмента, внутреннего и плоского шлифования.

Чашечные конические круги (тип 11) предназначены для заточки и доводки режущего инструмента, плоского шлифования в случаях, когда затруднено применение шлифовальных кругов других типов.

Тарельчатые круги (тип 14) применяют для резьбо-, шлице- и зубошлифования, заточки многозубых режущих инструментов. Круги с запрессованными крепежными элементами (тип 36) используют для плоского шлифования протяженных поверхностей торцом круга.

Характеристика абразивных кругов. Производительность и качество абразивной обработки, стойкость инструмента, себестоимость операции во многом зависят от правильного выбора шлифовального круга. В характеристику круга входят все параметры, определяющие строение, состав, свойства, форму, геометрические размеры, точность их исполнения и допускаемую скорость резания. Например, абразивный круг 24А 16 М2 8 К5/ПСС 40 15 тип 1 35 м/с: электрокорунд белый, зернистость 16, твердость М2, структура 8, связка керамическая К5, парообразователь — полистирол марки ПСС, зернистость 40, объемное содержание полистирола при прессовании равно 15 %, форма — круг прямого профиля, рабочая скорость 35 м/с; абразивная головка АW 8... 10 24А 25-Н СТ1 6 А 35 м/с ГОСТ 2447—82: головка цилиндрическая диаметром 8 мм и высотой 10 мм, белый электрокорунд, зернистость 25Н, степень твердости СТ1, 6-й номер структуры, связка керамическая, класс точности А, рабочая скорость 35 м/с.

По характеру обрабатываемых поверхностей можно различить четыре основные схемы шлифования: обработка круглых наружных поверхностей, обработка круглых внутренних поверхностей, обработка плоских поверхностей, обработка сложных (фасонных) поверхностей.

Круглое наружное шлифование в центрах (в патроне). При данной схеме шлифования в заготовке предварительно выполняют центровые отверстия. Диаметр шлифовального круга не зависит от диаметра обрабатываемой поверхности. Он определяется прочностью круга, параметрами станка, технологическими факторами обработки. Шлифование в основном производят периферией круга. Шлифовальному кругу придаются главное движение D , и движения поперечной и (или) продольной подачи. Движение круговой подачи D_A придается заготовке. Скорость главного движения определяется по формуле

$$v = \pi D_k n_k / (60 \cdot 1000),$$

где v — скорость главного движения, м/с; D_k — диаметр шлифовального круга, мм; n_k — частота вращения круга, мин⁻¹.

Круговая подача определяется по формуле

$$v_3 = \pi D_3 n_3 / 1000,$$

где v_3 — скорость движения заготовки, м/мин; D_3 — максимальный диаметр обрабатываемой поверхности, мм; n_3 — частота вращения заготовки, мин⁻¹.

Продольная подача измеряется в долях ширины шлифовального круга за оборот детали, в миллиметрах на оборот детали, в миллиметрах в минуту, в метрах в минуту. Поперечная подача и подача под углом измеряются в миллиметрах на оборот детали, в миллиметрах на ход стола или шлифовальной бабки, в миллиметрах на двойной ход стола или шлифовальной бабки, в миллиметрах в минуту.

Многопроходным шлифованием с продольной подачей (рис. 7.2, а) производят обработку с частичным выходом шлифовального круга из контакта (20...30 % ширины круга). Если обрабатываемая шейка ограничена торцевой поверхностью, на заготовке предварительно протачивают канавку для выхода шлифовального круга. После каждого двойного хода круга (заготовки) круг подается в

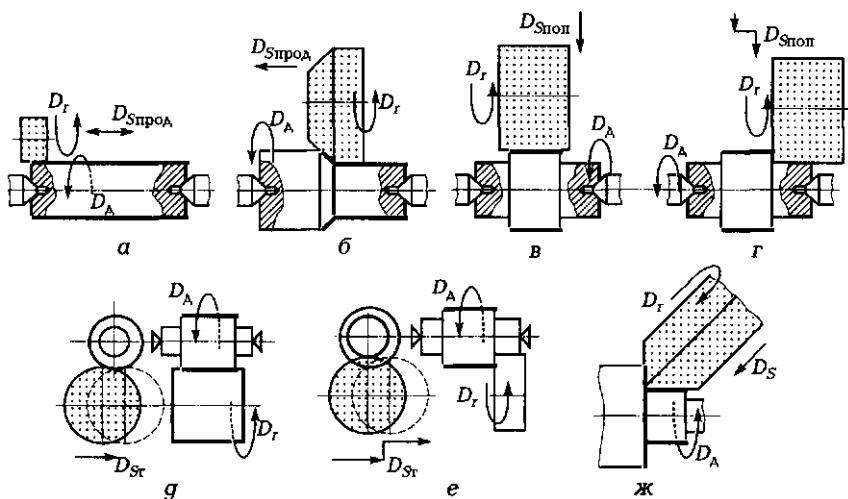


Рис. 7.2. Схемы круглого наружного шлифования в центрах:

а — многопроходное; б — глубинное; в, г — с поперечной подачей одно- и многопроходное соответственно; г, е — с тангенциальной подачей одно- и многопроходное соответственно; ж — врезное; D_r — главное движение; D_A — движение круговой подачи; D_S — движение подачи; $D_{Спрод}$ — движение продольной подачи; $D_{Сноп}$ — движение поперечной подачи; $D_{Ст}$ — движение тангенциальной подачи

радиальном направлении на заготовку на величину глубины резания. В конце обработки один или несколько проходов выполняют без радиальной подачи круга (выхаживание). Данная схема применяется для черновой и чистовой обработки поверхностей сравнительно большой длины (валы, оси). При обработке конических поверхностей заготовка поворачивается на угол, равный половине угла при вершине конуса.

При **однопроходном шлифовании с продольной подачей (глубинное шлифование)** весь припуск снимают за один проход (рис. 7.2, б). Для улучшения работы круга его заправляют на конус или уступами. Глубинное шлифование более производительное, чем многопроходное, но точность обработки ниже. Данная схема применяется для черновой и получистовой обработки деталей большой жесткости. При обработке конических поверхностей заготовка поворачивается на угол, равный половине угла при вершине конуса.

При обработке **методом поперечной подачи** шлифовальный круг равномерно или дискретно подается в радиальном направлении (движение $D_{Сноп}$). В конце обработки проводится выхажива-

ние. Этот метод более производителен, чем шлифование с продольной подачей. Точность обработки существенно зависит от геометрической точности круга, поэтому круг необходимо чаще править. Этим методом можно обрабатывать короткие фасонные поверхности. При однопроходной схеме (рис. 7.2, в) кругу придают осциллирующие движения вдоль оси заготовки, что повышает точность обработки. Данная схема применяется для черновой и чистовой обработки относительно коротких шеек заготовок большой жесткости, конических и фасонных поверхностей. При многопроходной схеме (уступами) (рис. 7.2, г) возможна последовательная обработка нескольких шеек, что обеспечивает малую величину несоосности обработанных поверхностей. Данная схема применяется для черновой и чистовой обработки относительно коротких шеек заготовок большой жесткости (ступенчатые валы, блоки шестерен, шейки коленчатого вала и др.), конических и фасонных поверхностей.

При обработке **методом тангенциальной подачи** шлифовальному кругу придается равномерное или дискретное движение подачи ($D_{ст}$) в тангенциальном направлении. Преимущество метода заключается в том, что в конце рабочего хода съем постепенно уменьшается, в момент совпадения осей круга и заготовки происходит выхаживание; шлифовальную бабку станка можно расположить внизу станка, существенно повышается точность обработки; облегчается автоматизация процесса. При однопроходной обработке (рис. 7.2, г) можно шлифовать фасонные поверхности. При многопроходной обработке (рис. 7.2, е) возможно последовательное шлифование нескольких шеек. Данные схемы применяются для черного и чистового шлифования относительно коротких цилиндрических, конических и фасонных поверхностей.

При необходимости одновременной обработки шейки и прилегающего к ней торца применяют **врезное шлифование** с подачей круга под углом к оси заготовки (рис. 7.2, ж).

Круглое наружное бесцентровое шлифование. При наружном бесцентровом шлифовании (рис. 7.3) заготовку 2 не закрепляют в центрах или в патроне, она опирается на нож 3 и базируется по обработанной поверхности, что существенно повышает точность обработки. Заготовка получает вращение от ведущего круга 4, скорость движения которого в 60—100 раз меньше скорости движения шлифующего круга 1. При расположении ведущего и шлифующего кругов на скрещивающихся осях заготовка получает дополнительное прямолинейное движение вдоль оси шлифующего круга. Вращение заготовке можно передавать магнитной планшайбой

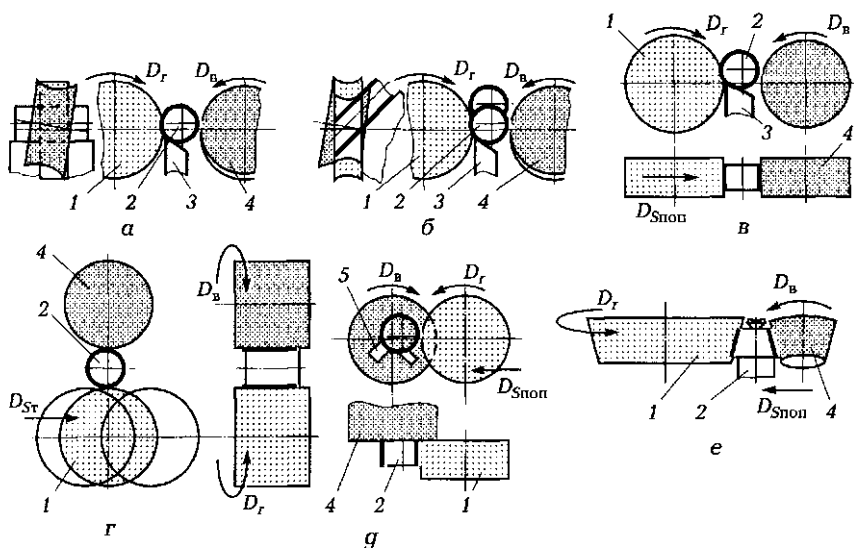


Рис. 7.3. Схемы круглого наружного бесцентрового шлифования:

а — с продольной подачей; б — с поворотом направляющей линейки; в — с радиальной подачей; г — с тангенциальной подачей; г — на планшайбе; е — с упором; 1 — шлифовальный круг; 2 — заготовка; 3 — нож; 4 — ведущий круг; 5 — планшайба; D_r — главное движение; D_b — движение ведущего круга; D_{sr} — движение тангенциальной подачи; $D_{сноп}$ — движение поперечной подачи

5 (рис. 7.3, г). В этом случае заготовка базируется торцом и удерживается силами магнитного притяжения.

При вращении заготовки от ведущего круга ее скорость (круговая подача) определяется по формуле

$$v_3 = \pi D_{в.к} n_{в.к} \eta \cos \alpha / 1000,$$

где v_3 — скорость движения заготовки, м/мин; $D_{в.к}$ — диаметр ведущего круга, мм; $n_{в.к}$ — частота вращения ведущего круга, мин^{-1} ; η — коэффициент, учитывающий проскальзывание ведущего круга и заготовки; α — угол наклона оси ведущего круга или ножа (направляющей линейки) к оси заготовки, обычно $\alpha = 2 \dots 6^\circ$.

Скорость продольного перемещения заготовки, мм/мин, равна

$$S_3 = \pi D_{в.к} n_{в.к} \eta \sin \alpha.$$

Шлифованием с поворотом ведущего круга и **продольной подачей** (рис. 7.3, а) или **поворотом направляющей линейки** (рис. 7.3, б) обрабатывают большие партии (500—1000 шт. в смену) гладких цилиндрических деталей (штифты, пальцы, подшипники-

вые кольца). Эти способы шлифования имеют большую производительность. Шлифованием с ведущим кругом и **радиальной подачей** шлифующего круга (рис. 7.3, в) обрабатывают цилиндрические, конические, ступенчатые и фасонные поверхности сравнительно небольшой длины. Шлифование с **тангенциальной подачей** шлифующего круга (рис. 7.3, г) позволяет обрабатывать те же поверхности, а при специальной наладке и плоские. Шлифование с поперечной подачей и установкой заготовки **на магнитной планшайбе** (см. рис. 7.3, г) позволяет с большой точностью обрабатывать цилиндрические поверхности небольшой длины (например, кольцо подшипника). Для обработки цилиндрических или конических деталей небольшой длины (к примеру, стержень клапана) применяют шлифование с упором (рис. 7.3, е).

Внутреннее шлифование в патроне. В данном случае диаметр шлифующего круга ограничен диаметром обрабатываемого отверстия, поэтому диаметр круга равен 0,5—0,8 диаметра обрабатываемого отверстия.

При внутреннем шлифовании в патроне движение круговой подачи D_A осуществляется за счет вращения заготовки со скоростью

$$v_3 = \pi D_3 n_3 / 1\,000,$$

где v_3 — скорость движения заготовки, м/мин; D_3 — диаметр обрабатываемого отверстия, мм; n_3 — частота вращения заготовки, мин⁻¹.

Способы обработки, виды движений, придаваемых абразивному кругу и заготовке (рис. 7.4), аналогичны наружному шлифованию в центрах (см. рис. 7.2).

Внутреннее бесцентровое шлифование. Круговая подача в этом случае осуществляется за счет вращения заготовки со скоростью

$$v_3 = \pi D_{в.к} n_{в.к} \eta / 1\,000,$$

где v_3 — скорость движения заготовки, м/мин; $D_{в.к}$ — диаметр ведущего круга мм; $n_{в.к}$ — частота вращения ведущего круга, мин⁻¹; η — коэффициент, учитывающий проскальзывание ведущего круга и заготовки. Заготовку устанавливают на **двух вращающихся роликах и неподвижной опоре** (рис. 7.5, а) или на **трех вращающихся роликах**, при этом ролик большего диаметра является ведущим (рис. 7.5, б). В обоих случаях наружная базовая поверхность должна быть окончательно обработанной. При установке заготовки на двух роликах шлифуют цилиндрические отверстия в деталях

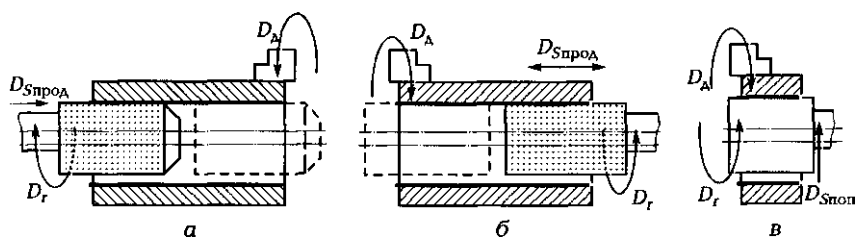
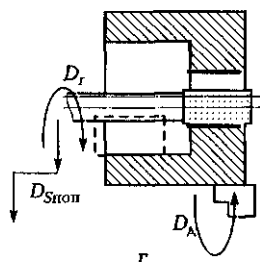


Рис. 7.4. Схемы внутреннего шлифования в патроне:

а, б — соответственно одно- и многопроходное с продольной подачей; в, г — соответственно одно- и многопроходное с поперечной подачей; D_r — главное движение; D_A — движение круговой подачи; $D_{спрoд}$ — движение продольной подачи; $D_{спoп}$ — движение поперечной подачи



сравнительно небольшой длины (кольца, втулки и т.д.). При установке заготовки на трех роликах возможно шлифование с продольной или поперечной подачей шлифовального круга. При обработке с продольной подачей производят черновое, получистовое и чистовое шлифование цилиндрических отверстий в кольцах и втулках. При обработке с поперечной подачей производят черновое шлифование отверстий в жестких втулках и кольцах.

Планетарное внутреннее шлифование. Заготовка при этом способе шлифования неподвижна. Для осуществления движения

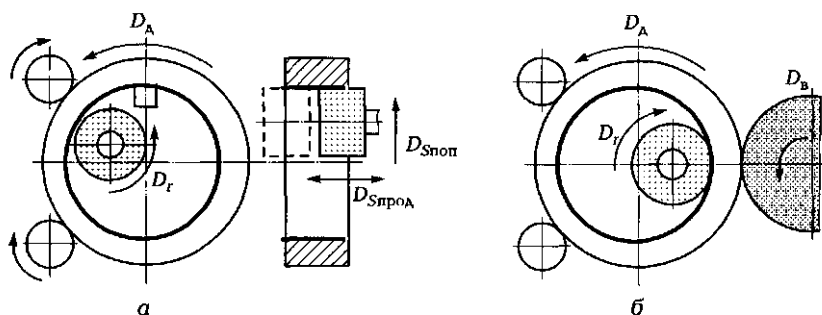


Рис. 7.5. Схемы внутреннего бесцентрового шлифования:

а — с установкой на двух роликах; б — с установкой на трех роликах; D_r — главное движение; D_A — движение круговой подачи; D_B — движение ведущего ролика; $D_{спрoд}$ — движение продольной подачи; $D_{спoп}$ — движение поперечной подачи

крутовой подачи шпинделю шлифовальной бабки придают дополнительное вращение вокруг оси обрабатываемого отверстия. При многопроходном шлифовании с продольной подачей (рис. 7.6, а) осуществляют черновую и чистовую обработку сквозных и глухих отверстий относительно большой длины в корпусных деталях. Однопроходное (глубинное) шлифование с продольной подачей (рис. 7.6, б) более производительное, но точность обработки ниже. При многопроходном шлифовании с продольной и поперечной подачами (рис. 7.6, в) осуществляют обработку ступенчатых отверстий в корпусных деталях. При однопроходном (глубинном) шлифовании с поперечной подачей (рис. 7.6, г) осуществляют черновую обработку сквозных, глухих, цилиндрических, конических и фасонных отверстий относительно малой длины в корпусных деталях большой жесткости.

Плоское шлифование. В данном случае главное движение D_r придается режущему инструменту — шлифовальному кругу. Движения подачи придают заготовке и кругу. Заготовку устанавливают на магнитный стол станка или в приспособления (например, в тисках, в синусных тисках, на синусной линейке), устанавлива-

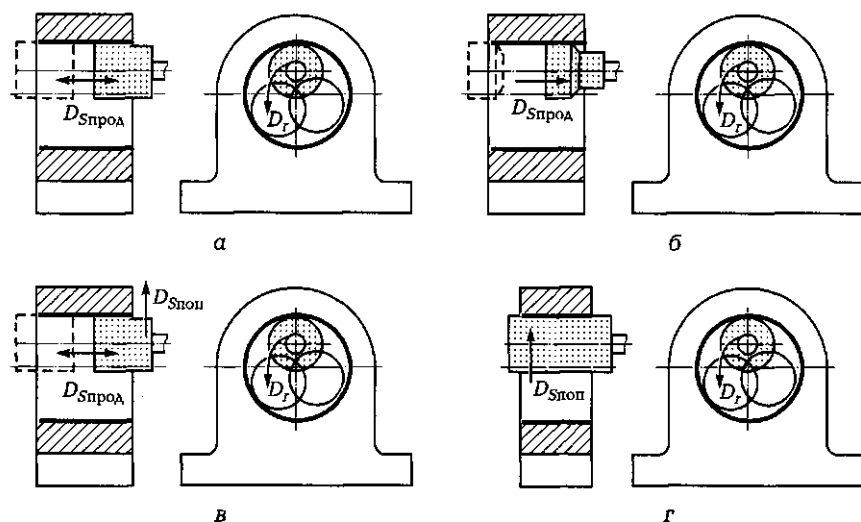


Рис. 7.6. Схемы внутреннего планетарного шлифования:

а, б — соответственно много- и однопроходное шлифование с продольной подачей; в — многопроходное шлифование с продольной и поперечной подачами; г — однопроходное шлифование с поперечной подачей; D_r — главное движение; $D_{\text{спрoд}}$ — движение продольной подачи; $D_{\text{спoп}}$ — движение поперечной подачи

емых на магнитном столе. Плоское шлифование характеризуется наличием прямолинейной продольной подачи $D_{\text{спрод}}$ (при установке заготовок на вращающийся стол — круговой подачей), поперечной подачей $D_{\text{споп}}$ и вертикальной (нормальной) подачей $D_{\text{св}}$. Продольную подачу (скорость детали) измеряют в метрах в минуту или миллиметрах в минуту. Поперечную и вертикальную подачи осуществляют после каждого двойного (одинарного) хода стола станка с заготовкой относительно круга и измеряют в миллиметрах на двойной (одинарный) ход стола станка. Припуск снимается за несколько ходов (многопроходное шлифование) или за один ход (однопроходное, силовое, или глубинное, шлифование). Глубинное шлифование более производительное, чем многопроходное, но требует большей жесткости упругой технологической системы и менее точное.

Плоское шлифование выполняется периферией или торцом круга. При шлифовании торцом круга колебания инструментального шпинделя меньше влияют на рельеф обработанной поверхности, поэтому обеспечивается большая точность и меньшая шероховатость обработанной поверхности.

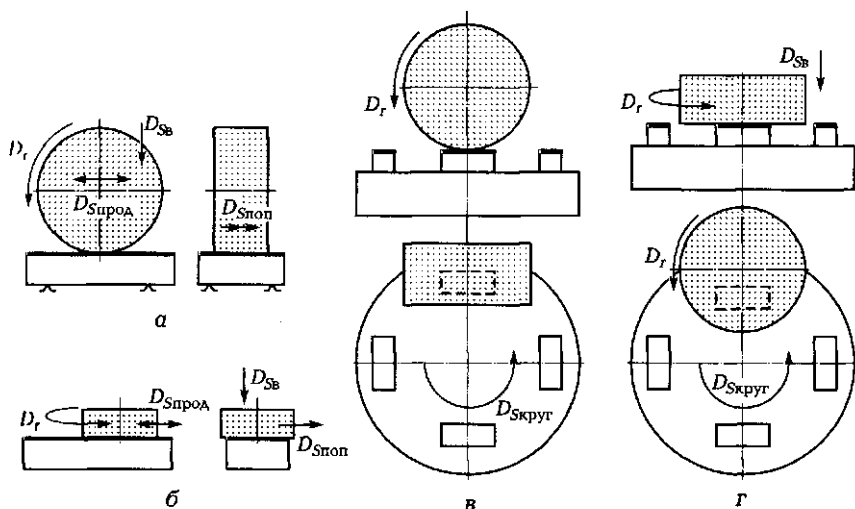


Рис. 7.7. Схемы плоского шлифования:

а — периферией круга с линейной подачей; б — периферией круга с круговой подачей; в — торцом круга с круговой подачей; г — торцом круга с линейной подачей; D_r — главное движение; $D_{\text{спрод}}$ — движение продольной подачи; $D_{\text{споп}}$ — движение поперечной подачи; $D_{\text{св}}$ — движение вертикальной подачи; $D_{\text{скруг}}$ — движение круговой подачи

Плоское шлифование периферией круга. Многопроходная схема с линейной продольной, поперечной и вертикальной подачами (рис. 7.7, а) применяется для чернового и чистового шлифования поверхностей с относительно большой шириной или комплектов деталей (шпонки, линейки, клинья). Однопроходная схема с линейной продольной и поперечной подачами применяется только для чернового шлифования поверхностей. Шлифование с круговой подачей (рис. 7.7, в) применяют для обработки относительно большой партии деталей небольших размеров (кольца, втулки).

Плоское шлифование торцом круга. Многопроходная схема с линейной продольной, поперечной и вертикальной подачами (рис. 7.7, б) применяется для чернового и чистового шлифования больших плоских поверхностей (плиты, столы). Многопроходная схема с линейной продольной и вертикальной подачами применяется для чернового и чистового шлифования поверхностей с шириной обработки меньше диаметра круга. Однопроходная схема с линейной продольной, поперечной и вертикальной подачами применяется для чернового шлифования. Однопроходная схема с линейной продольной подачей применяется только для чернового шлифования поверхностей с шириной обработки меньше диаметра круга.

Шлифование с круговой подачей (рис. 7.7, г) применяют для обработки относительно большой партии деталей небольших размеров (кольца, втулки).

7.4. СТАНКИ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ГРУППЫ

В условиях единичного и серийного производства широко используются универсальные круглошлифовальные, плоскошлифовальные и бесцентрово-шлифовальные станки.

Круглошлифовальный станок (рис. 7.8, а) состоит из станины 8, передней 4 и задней 17 бабок, шлифовальной бабки 6. На верхних направляющих станины установлен стол 1. Верхняя часть 2 стола выполнена поворотной, на ней установлен поворотный суппорт 10. На поворотном суппорте размещены передняя бабка с коробкой скоростей 3 и задняя бабка. На задней части станины размещена шлифовальная бабка с абразивным кругом 5. Стол станка перемещается в продольном направлении штоком 11 гидроцилиндра 9. При шлифовании длинных конических поверхностей заготовка устанавливается в центрах передней и задней бабок. Верхняя часть стола поворачивается на половину угла при вершине конуса. При шлифовании коротких конусных поверхностей заго-

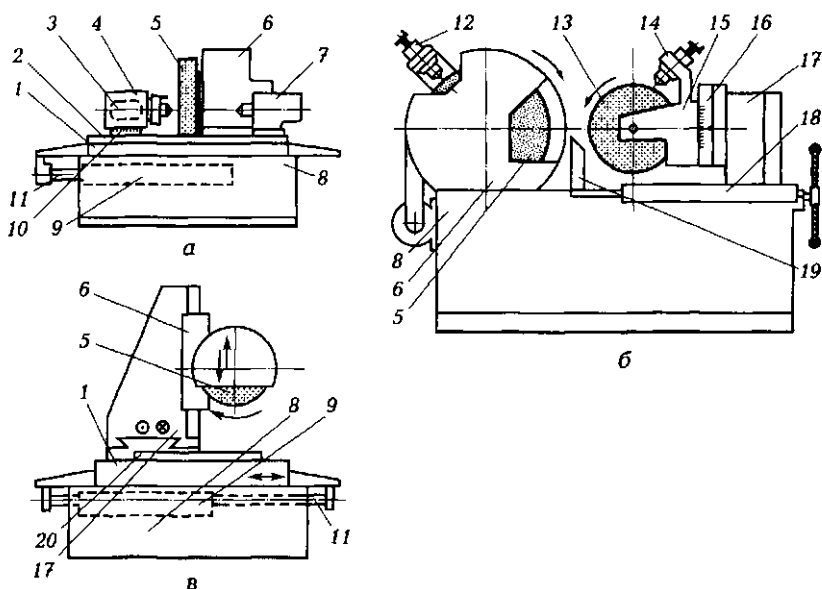


Рис. 7.8. Станки шлифовальной группы:

а — круглошлифовальный; б — бесцентрово-шлифовальный; в — плоскошлифовальный; 1 — стол; 2 — верхняя, поворотная часть стола; 3 — коробка скоростей; 4 — передняя бабка; 5 — абразивный круг; 6 — шлифовальная бабка; 7 — задняя бабка; 8 — станина; 9 — гидроцилиндр; 10 и 16 — поворотные суппорты; 11 — шток; 12 и 14 — механизмы правки; 13 — ведущий круг; 15 — бабка ведущего круга; 17 — колонна (задняя бабка); 18 — стол ведущего круга; 19 — нож; 20 — магнитная плита

товку зажимают в патроне передней бабки, которую поворачивают на требуемый угол с помощью поворотного суппорта.

Внутришлифовальный станок имеет аналогичную компоновку. Однако у него нет задней бабки, а шлифовальная бабка выполнена консольной. Поскольку круги для внутришлифовальных работ имеют малый диаметр, механизм главного движения должен обеспечить высокую частоту вращения шлифовального круга (до 10 000 мин⁻¹). Производительность внутришлифовальных станков значительно ниже, так как консольное расположение шлифовальной бабки и консольное закрепление шлифовального круга не обеспечивают необходимой жесткости системы УТС, вдобавок требуется частая правка круга.

Бесцентрово-шлифовальный станок показан на рис. 7.8, б. На станине 8 размещена шлифовальная бабка 6 с абразивным кругом 5. На верхних направляющих станины установлен стол 18 с вертикальной колонной 17, на которой размещены поворотный суппорт

16 и бабка 15 ведущего круга 13. Каждый из кругов периодически правят с помощью механизмов для правки 12 и 14. Заготовку устанавливают на нож 19 между шлифующим и ведущим кругами.

Круги выбираются таким образом, чтобы трение между заготовкой и ведущим кругом было больше трения между заготовкой и шлифующим кругом. Если необходимо продольное перемещение заготовки, ведущий круг поворачивают на угол $1 \dots 7^\circ$ относительно оси заготовки. Появляется осевая составляющая силы трения, которая придает заготовке осевое движение подачи. При этом гладкие цилиндрические заготовки (цилиндры, кольца) можно подавать непрерывно, что резко повышает производительность обработки.

Плоскошлифовальный станок показан на рис. 7.8, в. На поперечных направляющих станины 8 установлена вертикальная колонна 17. По вертикальным направляющим колонны перемещается шлифовальная бабка 6 с абразивным кругом 5, частично закрытым защитным кожухом. По горизонтальным направляющим станины перемещается стол 1. Продольные движения стола осуществляются штоком 11 гидроцилиндра 9. В направляющих стола устанавливаются заготовка, машинные тиски, синусные тиски или стол, магнитная плита (стол) 20. На магнитной плите могут устанавливаться заготовка, синусные тиски или плита.

7.5. ОТДЕЛОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Развитие современной автомобильной тракторной и сельскохозяйственной техники связано с увеличением скоростей движения, повышением надежности и производительности, уменьшением удельной массы (отношение массы машины к ее мощности). Возрастают требования к точности обработки деталей машин, что связано с необходимостью применения отделочных (финишных) операций, для которых характерны небольшие толщины срезаемого слоя, незначительные силы резания и тепловыделение. Поэтому отделочная обработка позволяет повысить точность обработанной поверхности, нанести на нее необходимый микрогеометрический рисунок, повысить эксплуатационные свойства детали.

К отделочным видам обработки относятся тонкое шлифование, алмазное точение и фрезерование, хонингование, суперфиниширование, доводка-притирка, полирование, ленточное шлифование, абразивно-жидкостная обработка, виброабразивная обработка, магнитно-абразивная обработка.

7.5.1. Тонкое шлифование, прецизионное точение и фрезерование

Тонкое шлифование производят мягкими мелкозернистыми шлифовальными кругами на больших скоростях резания (от 35 м/с) с обильной подачей СОТС. Процесс характеризуется снятием малых припусков (0,04...0,08 мм на сторону), малыми подачами (0,005...0,1 мм/об), частой правкой круга. Перед окончанием обработки шлифовальный круг работает без подачи (выхаживание), при этом сьем металла происходит за счет упругих сил в упругой технологической системе УТС с постепенным уменьшением силы резания. Процесс осуществляется на станках высокой и особо высокой точности, обеспечивающих плавность хода всех механизмов, высокой жесткости и виброустойчивости упругой технологической системы УТС. Тонкое шлифование требует хорошей фильтрации СОТС, чтобы исключить попадание абразива и стружки в зону шлифования.

Прецизионная обработка (тонкое точение и растачивание, алмазное точение, тонкое фрезерование) характеризуется высокими скоростями резания (100...1 000 м/мин), малыми подачами (0,01...0,15 мм/об), малой глубиной резания (0,05...0,3 мм) при высокой виброустойчивости технологической системы УТС. Сталь-

Таблица 7.6. Инструментальные материалы для прецизионной обработки

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал
Чугун, цветные сплавы, пластмассы, порошковые материалы	Твердые сплавы ВК2, ВК3, ВК4, ВК8
Легированные и конструкционные стали	Твердые сплавы Т14К8, Т15К6, Т30К4, Т60К6
	Безвольфрамовые твердые сплавы КНТ16, ТН20
Цветные сплавы, пластмассы, неметаллические материалы	Алмазы природные типа карбонадо: АРК4, АРВ1
Закаленные стали, высокопрочный чугун	Сверхтвердые материалы: гексагонит-р, эльбор-Р
Закаленные стали, высокопрочный чугун при высокой жесткости технологической системы УТС	Минералокерамика и керметы

ные заготовки с прерывистой обрабатываемой поверхностью (наличие пазов, шлицов, отверстий и т. д.), детали из высокопрочных сталей и чугуна обрабатывают при скоростях резания до 50 м/мин (при применении инструментов с режущей частью из сверхтвердых материалов скорость резания можно повысить до 150 м/мин). Рекомендации по применению инструментальных материалов приведены в табл. 7.6.

Прецизионная обработка позволяет получить шероховатость поверхности Ra 0,02...0,63 мкм, точность по 5—9-му квалитетам.

7.5.2. Хонингование

Хонингование — отделочный метод обработки внутренних поверхностей абразивными брусками.

Хонингование применяется для повышения точности формы, размера и снижения шероховатости отверстий, а также создания специфического микропрофиля обработанной поверхности. Хонингование применяется в условиях серийного и массового производства после операций растачивания, развертывания, протягивания и шлифования.

Обработку производят с помощью абразивных или алмазных брусков, закрепленных в хонинговальной головке (хоне).

В зависимости от вида крепления хона различают несколько схем хонингования (рис. 7.9). Схему хонингования, когда хон жестко связан со шпинделем станка, а заготовке сообщают две степени свободы (рис. 7.9, а), применяют для обработки заготовок параллельными нижней и верхней плоскостями и перпендикулярной им осью отверстия. При обработке мелких и среднегабаритных заготовок применяют схему с жесткой связью хона и шпинделя станка, но заготовке сообщают до четырех степеней свободы (рис. 7.9, б). Если несоосность шпинделя и обрабатываемого отверстия менее 0,05 мм, применяют одношарнирное крепление хона (рис. 7.9, в), если несоосность более 0,05 мм — двухшарнирное крепление хона (рис. 7.9, г).

При обработке тонкостенных заготовок или в случаях, когда трудно обеспечить соосность отверстия и шпинделя, применяют двухшарнирное крепление, а заготовке сообщают четыре степени свободы (рис. 7.9, г).

Хону, как правило, сообщают три вида движения: вращение D_1 , возвратно-поступательное перемещение D_2 и радиальное движение подачи. При вибрационном хонинговании хону или заготовке

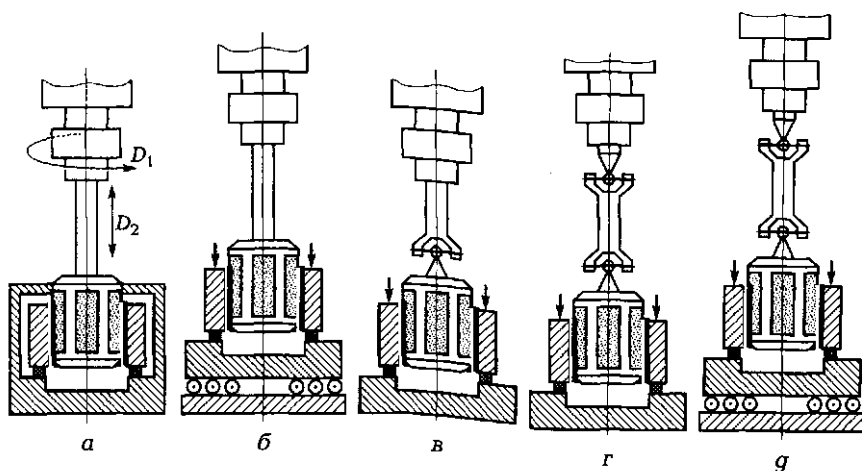


Рис. 7.9. Схемы хонингования:

a — с двумя степенями свободы заготовки; D_1 — главное движение хона; D_2 — возвратно-поступательное перемещение хона; *б* — с четырьмя степенями свободы заготовки; *в* — с одношарнирным креплением хона; *г* — с двухшарнирным креплением хона; *г* — с двухшарнирным креплением хона и четырьмя степенями свободы заготовки

придают дополнительное круговое или возвратно-поступательное движение с малой амплитудой (1...4 мкм) и частотой до 20 двойных ходов в минуту. Скорость главного движения D_1 для обработки стали составляет 45...60 м/мин, для обработки чугуна — 60...75 м/мин. Соотношение скоростей движений D_1 и D_2 равно 1,5...10.

На рис. 7.10, *a* показаны развертка обработанной поверхности и схема образования сетки. Крайнее нижнее 1 и верхнее 2 положения абразивных брусков устанавливаются с перебегом h . Перебег необходим для точной обработки отверстия. Минимальные отклонения формы получаются при перебеге h , равном 0,33 длины бруска, и длине бруска, равной 0,5...0,75 длины обрабатываемого отверстия. При каждом двойном ходе бруски оказываются в положении 3, т.е. смещаются на шаг t . Изменяя соотношение D_1/D_2 , можно менять угол наклона сетки. При вибрационном хонинговании вид сетки изменится (рис. 7.10, *б*).

По характеру крепления брусков в хоне различают хоны с подресоренными брусками (при обработке отверстий не исправляются такие погрешности формы, как непрямолинейность оси отверстия), хоны с жестким креплением брусков (при обработке про-

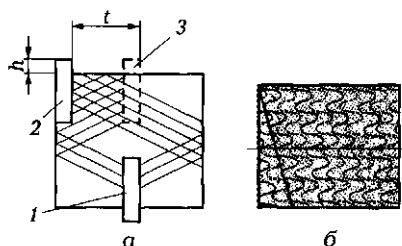


Рис. 7.10. Развертка обработанной поверхности:

а — обычное хонингование: *1* и *2* — нижнее и верхнее положение абразивных брусков; *3* — смещение бруска на один шаг; *h* — перебег; *t* — шаг смещения брусков; *б* — вибрационное хонингование

исходит исправление всех погрешностей формы, но точность обработки ниже).

Хонинговальные бруски изготавливают из электрокорунда, карбида кремния или синтетических алмазов. Зернистость абразива от № 8 до М20 (для алмазных брусков зернистость от 400 до 14). Для обеспечения базирования хона по обработанной поверхности число брусков в головке должно быть кратно трем.

7.5.3. Суперфиниширование и микрофиниширование

Суперфиниширование — отделочный метод обработки наружных поверхностей мелкозернистыми абразивными брусками, совершающими колебательные движения с амплитудой 2...5 мм и частотой до 2 000 двойных ходов в минуту.

Суперфиниширование применяют для отделочной обработки трущихся поверхностей, когда необходимо повысить их эксплуатационные свойства. Это достигается благодаря обеспечению малой шероховатости (Ra 0,05... 0,6 мкм), уменьшению погрешностей формы до 0,3 мкм, нанесению на поверхность оптимального микрогеометрического рисунка, сглаживанию вершук микронеровностей (увеличение площади фактической опорной поверхности).

К преимуществам суперфиниширования можно отнести простоту применяемого оборудования, возможность использования универсальных токарных или шлифовальных станков, головок-вибраторов, высокую производительность и простую автоматизацию процесса.

Сущность процесса состоит в микрорезании обрабатываемой поверхности одновременно большим количеством мельчайших абразивных зерен (до 10 000 зерен/мм²). При этом снимаются тончайшие стружки (до 0,01 мм), одновременно скорость съема металла достигает 1 ... 1,5 мкм/с. Большинство зерен не режет, а пластически деформирует металл — микронеровности сглаживаются, и поверхность получает зеркальный блеск.

По характеру прижима брусков в коне различают два вида суперфиниширования (рис. 7.11, а): кинематическое и силовое. При кинематическом суперфинишировании брусок 2 прижимается к заготовке 3 пневмоцилиндром или гидроцилиндром через пружину 1. В результате — затруднено исправление огранки и овальности обрабатываемой поверхности. При силовом суперфинишировании брусок прижимается к заготовке пневмоцилиндром или гидроцилиндром через жесткое промежуточное звено 4. Силовое суперфиниширование хорошо исправляет погрешности формы.

Основными рабочими движениями (рис. 7.11, б) являются вращение заготовки $D_{\text{окр}}$, возвратно-поступательное (колебательное)

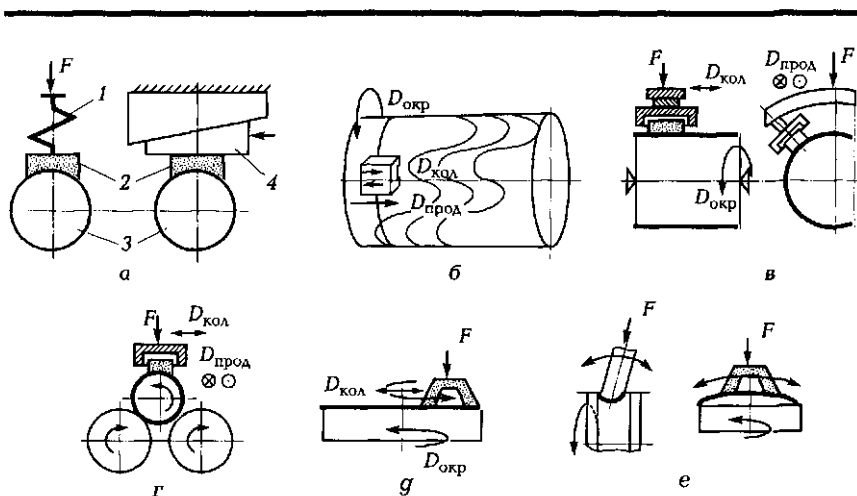


Рис. 7.11. Суперфиниширование:

а — схема суперфиниширования: 1 — пружина; 2 — брусок; 3 — заготовка; 4 — промежуточный жесткий элемент; б — основные движения; в — суперфиниширование в центрах; г — бесцентровое суперфиниширование; д, е — суперфиниширование плоских и фасонных поверхностей соответственно; F — сила прижима; $D_{\text{окр}}$ — вращение заготовки; $D_{\text{кол}}$ — возвратно-поступательное (колебательное) движение бруска; $D_{\text{прод}}$ — движение продольной подачи

движение бруска $D_{\text{кол}}$ и движение продольной подачи $D_{\text{прод}}$. Иногда на брусок накладывают дополнительные ультразвуковые колебания, что позволяет увеличить скорость съема металла, и бруски самозатачиваются. Цикл обработки поверхности суперфинишированием складывается из времени удаления исходной шероховатости T_1 , времени резания T_2 , времени перехода от резания к трению T_3 , времени полирования T_4 . Как правило, $T_1 = (0,15 \dots 0,2) T_{\text{ц}}$; $T_2 = (0,4 \dots 0,5) T_{\text{ц}}$; $T_3 = (0,2 \dots 0,25) T_{\text{ц}}$; $T_4 = (0,2 \dots 0,25) T_{\text{ц}}$, $T_{\text{ц}}$ — время цикла обработки.

Наиболее распространенные схемы суперфиниширования: в центрах с продольным или поперечным движением подачи (рис. 7.11, в), бесцентровое (рис. 7.11, г), суперфиниширование плоских (рис. 7.11, г) и фасонных (рис. 7.11, е) поверхностей.

Развитием суперфиниширования является микрофиниширование, характеризующееся большими давлениями на брусок и жесткой фиксацией брусков, что значительно уменьшает погрешности предшествующей обработки.

7.5.4. Доводка-притирка

Доводка (притирка) — отделочная операция, при которой съем металла с обрабатываемой поверхности производится абразивными зёрнами, свободно распределёнными в пасте или суспензии, нанесенной на поверхность притира. Операция выполняется на малых скоростях и при переменном направлении рабочего движения притира. Эта наиболее трудоемкая отделочная операция позволяет получить шероховатость обработанной поверхности Rz 0,01 ... 0,05 мкм, отклонения формы — 0,05 ... 0,3 мкм.

Различают доводку ручную, полумеханическую и механическую.

Ручная доводка применяется в единичном и мелкосерийном производстве, а также при обработке деталей сложной формы. Точность и качество обработки зависят от квалификации рабочего. Высококвалифицированный специалист обеспечивает точность формы в пределах 0,5 ... 2 мкм.

Полумеханическая (машинно-ручная) доводка используется в мелкосерийном производстве. Ее выполняют с помощью электрических или пневматических доводочных приспособлений. Главное движение выполняется приспособлением, а движение подачи — от руки.

Механическая притирка применяется в крупносерийном и массовом производстве на специальных притирочных станках.

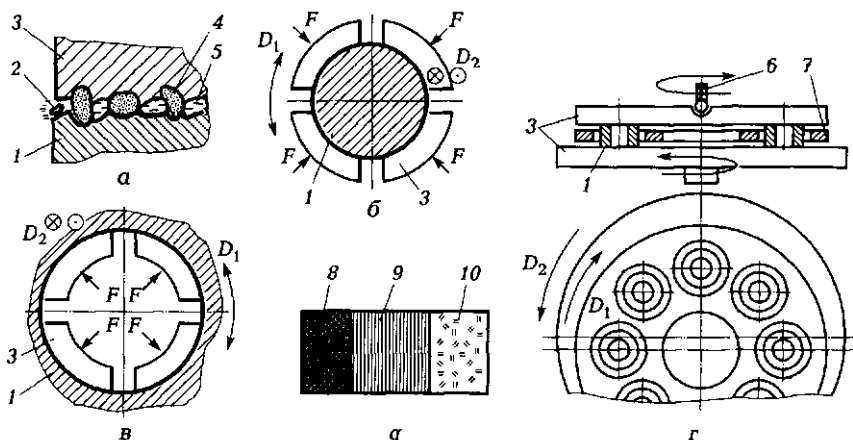


Рис. 7.12. Доводка-притирка:

а — схема притирки; *б* — притирка наружных цилиндров; *в* — притирка внутренних цилиндров; *г* — притирка плоских поверхностей; *д* — доводочные плиты; 1 — заготовка; 2 — стружка; 3 — притир; 4 — абразивное зерно; 5 — связующая жидкость; 6 — подвеска; 7 — сепаратор; 8, 9 и 10 — доводочные плиты для предварительной, чистовой и окончательной обработки соответственно; D_1 и D_2 — движения притира; F — сила прижима

Сущность доводки-притирки (рис. 7.12, *а*) заключается в том, что химическое воздействие кислой среды пасты сочетается с механическим воздействием абразива. Абразивные зерна 4 находятся в составе связующей жидкости 5 между обрабатываемой поверхностью заготовки 1 и притиром 3, вдавливаются в поверхность притира, так как он выполнен из более мягкого материала, чем заготовка, и шаржируются в нем. При взаимном перемещении притира и заготовки абразивные зерна снимают тончайшие стружки 2. Под воздействием кислоты обработанная поверхность покрывается оксидной пленкой. Вначале микронеровности соприкасаются с притиром по малой контактной площади. Срезаются оксидные пленки с выступов микронеровностей. Этот этап характеризуется большими удельными давлениями и пластическим деформированием выступов микронеровностей. С увеличением контактной площади давление уменьшается, снижается толщина снимаемого слоя. При этом снимаются только оксидные пленки. Большую роль играет вязкость связующей жидкости. Толщина слоя жидкости между притиром и заготовкой должна быть меньше величины выступающих из притира режущих зерен. В качестве связующей жидкости использу-

ют машинное масло, керосин, стеарин, вазелин. Материалом для притира служит серый чугун, бронза, красная медь, твердые породы дерева. В качестве абразива используют порошки, микропорошки или субмикропорошки электрокорунда, карбида кремния, карбида бора, оксида хрома, оксида железа и др. В состав притирочных паст входят химически активные вещества: олеиновая или стеариновая кислота. Состав притирочных паст для обработки незакаленных и закаленных конструкционных сталей приведен в табл. 7.6.

Притирка наружной цилиндрической поверхности (рис. 7.12, б) заготовки 1 осуществляется притиром 3 в виде кольца с прорезьями. Притиру сообщают возвратно-вращательное движение D_1 и возвратно-поступательное движение D_2 . Возможно равномерное дополнительное вращение заготовки. Притирка осуществляется вручную или на металлорежущих станках. Аналогичные схема и движения применяются при притирке внутренних цилиндрических поверхностей (рис. 7.12, в). В качестве притира используется разжимная втулка с прорезьями. Плоские поверхности можно притирать вручную и на специальных доводочных станках (рис. 7.12, г). Заготовки 1 устанавливаются между двумя чугунными дисками-притирами 3 в окнах сепаратора 7. Сепаратор относительно дисков установлен с эксцентриситетом 5...15 мм. Диски-притиры имеют плоские поверхности и вращаются в разные стороны, верхний имеет самоустанавливающуюся подвеску 6, что обеспечивает строгую параллельность рабочих плоскостей дисков-притиров. При вращении дисков-притиров заготовки получают вращательное движение и дополнительное движение скольжения. Эксцентричное расположение сепаратора обеспечивает дополнительное движение заготовок в радиальном направлении, что приводит к равномерному изнашиванию дисков-притиров. При ручной притирке плоских поверхностей используют доводочные плиты (рис. 7.12, г) из серого перлитного чугуна твердостью 170...230 HB. Размеры плит выбирают в зависимости от габаритов заготовки, их рабочая поверхность выполняется с высокой геометрической точностью (например, допуск неплоскостности плит размерами 250×250×400 мм 1...4 мкм). Рабочая поверхность плит разбита на три участка: 8 — предварительная, 9 — чистовая, 10 — окончательная доводка. Можно использовать три отдельные плиты (предварительную, чистовую, окончательную). В целях обеспечения равномерного изнашивания рабочих поверхностей плит при работе плиту перемещают крутовыми движениями.

7.5.5. Полирование

Полирование — это заключительная операция механической обработки заготовки, выполняемая с целью уменьшения шероховатости поверхности и придания ей зеркального блеска. Полирование обеспечивает шероховатость поверхности $Ra\ 0,02...0,16\ \mu\text{м}$; $Rz\ 0,05...0,1\ \mu\text{м}$.

Эта отделочная операция осуществляется механическими, химическими, электромеханическими и другими методами. Различают полирование кругами; полирование лентами; абразивно-жидкостную обработку; виброабразивную обработку; магнитно-абразивную обработку.

Полирование мягкими абразивными кругами. Данный вид полирования применяется при декоративной окончательной отделке деталей или при подготовке поверхности под гальванические покрытия. В процессе полирования обрабатываемая поверхность заготовки под давлением прижимается к рабочей поверхности вращающегося абразивного круга. На рабочей поверхности закреплен слой абразива или нанесена полировальная паста. Обработка ведется на простых по конструкции станках, универсальных станках или с помощью ручных полировальных машин.

Промышленностью выпускаются лепестковые, эластичные, войлочные, тканевые, бумажные, фетровые, хлопчатобумажные, гибкие полировальные и другие виды полировальных кругов.

Лепестковые шлифовальные круги имеют диаметр 200 и 300 мм, ширину 40; 50 и 100 мм, посадочный диаметр 44,5 мм. Они различаются по способу крепления абразивных лепестков в ступице круга.

Армированные неразборные круги с клеевым креплением лепестков (рис. 7.13, а) предназначены для декоративно-полировальных работ. Круги состоят из двух штампованных фланцев 1 и приклеенных к ним (и между собой) лепестков 2. В качестве клея применяется композиция на основе эпоксидной смолы.

Армированные разборные круги с клеевым соединением лепестков и механическим креплением блока с арматурой (рис. 7.13, б) применяются на универсальных плоскошлифовальных и круглошлифовальных станках. Круги состоят из алюминиевой ступицы 4, двух фланцев 1, стягивающих болтов 3 и набора лепестков 2. Предварительную установку и крепление лепестков осуществляют при помощи кольцевых выступов фланцев, входящих в радиусные пазы лепестков. Лепестки связаны в единый блок при помощи композиции на основе эпоксидной смолы.

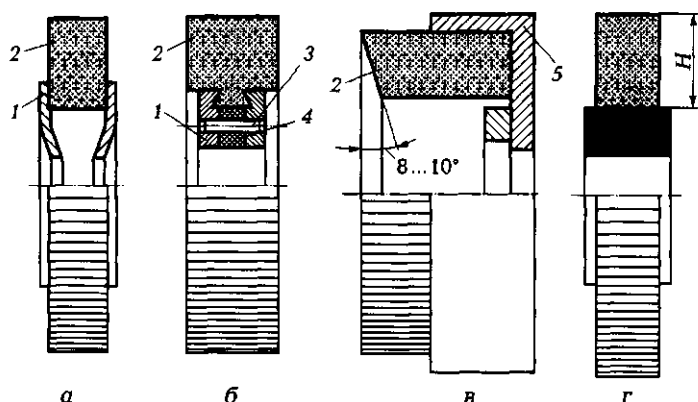


Рис. 7.13. Лепестковые полировальные круги:

а — армированные неразборные; *б* — армированные разборные; *в* — торцевые; *г* — безарматурные; 1 — фланец; 2 — лепесток; 3 — болт; 4 — ступица; 5 — планшайба; *H* — высота лепестка

Торцевые лепестковые круги (рис. 7.13, *в*) состоят из сборной планшайбы 5 и набора лепестков 2. Блок из лепестков закреплен в планшайбе с помощью композиции на основе эпоксидной смолы. Торцевой круг имеет угол поднутрения торца лепестков $8...10^\circ$. При установке круга лепестки разворачиваются в радиальном направлении в сторону вращения круга на этот угол.

Лепестковые круги диаметром до 500 мм можно изготавливать безарматурными (рис. 7.13, *г*).

При выборе размеров лепестковых кругов необходимо учитывать, что увеличение диаметра и высоты лепестков повышает производительность круга, но требует более мощного и дорогого оборудования. Определяющее значение при выборе круга имеет высота лепестков *H*. При коротких лепестках (соответственно большом диаметре ступицы) количество лепестков большое. Круг имеет высокую производительность, но лепестки более жесткие, и ухудшается качество обработки.

При чрезмерно большом числе лепестков повышается так называемая плотность круга, приходится уменьшать деформацию лепестков круга в радиальном направлении, а это отрицательно сказывается на производительности. При повышении угловой скорости круга и деформации лепестков повышается производительность обработки, но увеличивается тепловыделение. Разогревается клеевая основа лепестков круга, снижается прочность удержания абразивных зерен, и, как следствие, ухудшается качество и

Таблица 7.7. Составы абразивных паст и суспензий для доводки

Абразивный материал	Зернистость	Компоненты, %								
		Абразив- ный материал	Масло И-20	Стеарин	Вазелин	Нитрида натрия	Олеиновая кислота	Парафин	Керосин	Вода
Предварительная притирка (Ra 0,46 ... 0,63 мкм)										
53С—55С, 13А—25А	M20—M40	5 ... 10	24 ... 50	3 ... 10	—	—	—	—	40 ... 50	—
13А—25А	M20—M40	30 ... 40	23 ... 40	10 ... 20	10 ... 60	—	—	—	—	—
53С—55С, 23А, 24А, 43А, 44А	M10—M28	5 ... 10	—	10 ... 20	15 ... 20	—	—	—	50 ... 60	—
Получистовая притирка (Ra 0,08 ... 0,16 мкм)										
53С—55С	M10—M14	25 ... 30	—	—	—	1 ... 2	—	—	—	68 ... 69
13А—25А	M5—M10	25 ... 30	—	—	—	1 ... 2	—	—	—	68 ... 69
Чистовая притирка (Ra 0,02 ... 0,04 мкм)										
13А—25А	M3—M5	10 ... 15	—	10 ... 20	5 ... 10	—	3 ... 5	—	70 ... 80	—
23А, 24А	M1—M5	5	—	3	Оливковое масло 92	—	—	—	—	—
Окончательная притирка (Ra 0,022 ... 0,1 мкм)										
Глинозем, оксид хрома, крокус	M1—M3	10 ... 15	—	1020	5 ... 10	—	—	3 ... 5	70 ... 80	—

производительность обработки. Например, при полировании заготовки из стали 45 крутами диаметром 300 мм зернистостью 14A8 предельные режимы полировки следующие: деформация лепестков 0,85; скорость резания 40 м/с. Применение охлаждения позволяет повысить скорость резания. Для снижения шероховатости обработанной поверхности, уменьшения пылевыведения и увеличения стойкости круга лепестки пропитываются следующим составом (в весовых частях): пластичная смазка ПВК — 55, парафин — 40, графит — 5.

Войлочные круги обладают большой эластичностью, хорошо поддаются правке, достаточно прочно удерживают нанесенные на них абразивные порошки и пасты. Войлочные круги подразделяются на тонкие, полутрубошерстные и грубошерстные. Тонкие круги применяются при обработке ответственных деталей машин и приборов, полутрубошерстные — для полирования хирургических инструментов, деталей точных измерительных приборов, стекла. В остальных случаях применяются грубошерстные круги.

Наиболее распространены **тканевые полировальные круги**. Их изготавливают диаметром 150...500 мм, скорость резания составляет 80...85 м/с. Различают дисковые, непрошитые, секционные, наборные, прошитые и специальные круги. Непрошитые круги выполняются из отдельных слоев однородной ткани, склеенных под давлением. После затвердевания клея круг шлифуется и профилируется, затем пропитывается клеем или жидким стеклом и накатывается абразивным порошком. Секционные круги изготавливают из отдельных кусков материи, уложенных между двумя цельными матерчатыми дисками, которые прошиваются.

Бумажные полировальные круги выполняют из сшитых или спрессованных листов гладкой или гофрированной бумаги. Большая жесткость таких кругов позволяет получить шероховатость обработанной поверхности Ra 1,25...2,5 мкм.

Наиболее прогрессивным полировальным инструментом являются **гибкие полировальные круги**. От обычных абразивных кругов они отличаются большой эластичностью, высокой термостойкостью, механической прочностью. Они изготавливаются прессованием и вулканизацией смеси каучукосодержащих связок с абразивными зёрнами, не требуют обмазки клеем и накатки абразивом. Полировальные круги выполняют на гибкой вулканитовой (B5), бакелитовой с графитовым наполнителем (Б4), глифталевой (ГФ) и поливинилформалевой (ПФ) связках. Круги на вулканитовой связке изготавливают из нормального и белого электрокорунда, черного или зеленого карбида кремния, их зернистость — 40,

32, 35, 20, 16, твердость — ГВМ (гибкий весьма мягкий), ГМ (гибкий мягкий), ГС (гибкий средней твердости), ГТ (гибкий твердый). Бакелитовые круги изготавливаются из тех же абразивных материалов зернистостью М28, их твердость — М3. Глифталевые круги изготавливают из карбида кремния зернистостью 5, М40, М28, М20, М14, их твердость — С и СТ. Круги на поливинилформальной связке изготавливаются из карбида кремния зернистостью 25, 20, 16, 12, 10, 8, 6.

Абразивные пасты и суспензии, применяемые при полировании, в основном изготавливаются по техническим условиям потребителей.

Полировочные пасты содержат мягкие абразивы: оксиды железа, хрома, алюминия, венскую известь, маршалит; зернистость — менее 1 мкм. По консистенции пасты подразделяют на твердые (Т) и мазеобразные (М), по концентрации — на повышенные (П) и нормальные (Н), по смываемости — на смываемые органическими растворителями (О), смываемые водой (В), смываемые органическими растворителями и водой (ВО).

В состав паст также входят плавкие связки, смазывающие вещества и поверхностно-активные вещества (ПАВ). В качестве связки используются стеарин, парафин, воск, олеиновая кислота, вазелин, свиной жир (лярд). Смазывающим материалом служат керосин, бензин, вода, трансформаторное или иные масла. В качестве ПАВ обычно используется олеиновая или стеариновая кислота.

Наибольшее применение в промышленности получили пасты ГОИ (Государственный оптический институт). Они оказывают на обрабатываемую поверхность одновременно и механическое, и химическое воздействие. Номер пасты соответствует ее абразивной способности.

Суспензии состоят из микропорошка и жидкости. В зависимости от условий обработки соотношение концентраций микропорошка и жидкости в диапазоне от 1:5 до 1:1. Приготовление суспензий достаточно просто: вначале смешивают жидкие компоненты (керосин, веретенное масло, стеарин), затем при непрерывном помешивании добавляют абразивный порошок.

Полирование лентами. К преимуществам этого вида полирования относятся постоянство скорости резания, возможность обработки больших и фасонных поверхностей, отсутствие необходимости в балансировке и правке инструмента, безопасность работы. Абразивные зерна могут работать в условиях жесткого закрепления (абразивная лента) или в режиме податливости (лента с нанесенной на ней абразивной пастой).

При ленточном полировании под воздействием нагрузок лента растягивается, что снижает производительность обработки. Поэтому, кроме высокой прочности на разрыв, лента характеризуется относительным удлинением и эластичностью. Высокоэластичные ленты (на мездровой основе) применяют для обработки труднодоступных мест и узких пазов.

В зависимости от требований к качеству обработанной поверхности и вида заготовки различают полирование заготовки 2 на свободной ветви ленты 1 (рис. 7.14, а), полирование с поджатием ленты 1 к обрабатываемой поверхности 2 роликом (рис. 7.14, б, е), полирование с поджатием ленты 1 к обрабатываемой поверхности 2 специальным копиром 3 (рис. 7.14, в) или упругим элементом 4 (рис. 7.14, г), бесцентровое полирование (рис. 7.14, г), полирование внутренних поверхностей труб бесконечной лентой (см. рис. 7.14, е), полирование внутренних поверхностей на свободной ветви ленты (рис. 7.14, ж).

Абразивно-жидкостная обработка. Такая обработка применяется для полирования сложных фасонных поверхностей. Сущность такой обработки заключается в подаче на обрабатываемую поверхность суспензии с большой скоростью под давлением. Абразивные зерна, срезая выступы микронеровностей, создают

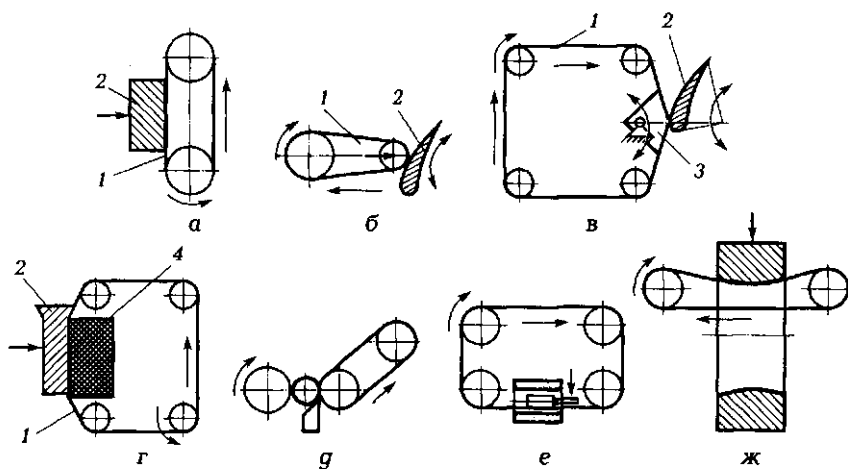


Рис. 7.14. Полирование лентами:

а — на свободной части ленты; б — с поджатием роликом; в — с поджатием копиром; г — с поджатием упругим элементом; е — бесцентровое; ж — бесконечной лентой с поджатием; ж — бесконечной лентой на свободной части ленты; 1 — лента; 2 — заготовка; 3 — копир; 4 — упругий элемент

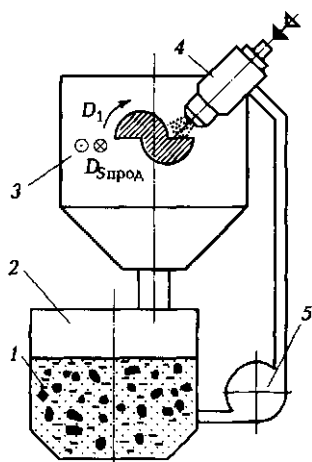


Рис. 7.15. Установка для абразивно-жидкостной обработки:

1 — суспензия; 2 — бак; 3 — рабочая камера; 4 — сопло; 5 — насос; D_1 — движение притира; $D_{\text{прод}}$ — движение продольной подачи

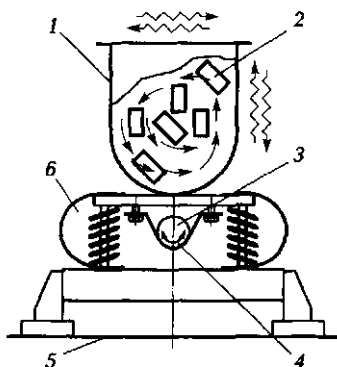


Рис. 7.16. Установка для виброабразивной обработки:

1 — контейнер; 2 — заготовка; 3 — маховик; 4 — груз; 5 — жесткое основание; 6 — упругое основание

эффект полирования. При подаче суспензии с воздухом повышается производительность обработки, но увеличивается ее шероховатость.

Установка для абразивно-жидкостной обработки (рис. 7.15) состоит из рабочей камеры 3 с обрабатываемой заготовкой, твердосплавного сопла 4 для подачи суспензии 1, бака 2 с абразивной суспензией и насоса 5. Наибольший съем металла получается при угле наклона сопла 45° .

Вибрационная обработка в абразивной среде. Данный вид обработки используется для повышения производительности и качества отделочных операций. Главное движение резания осуществляют абразивные зерна, совершающие колебания под воздействием внешней возмущающей силы (вибраций). Схема установки для вибрационной обработки показана на рис. 7.16. Заготовки 2 загружаются в контейнер 1, заполненный рабочей средой. Контейнер установлен на упругом 6 и жестком 5 основаниях. При вращении маховика 3 с несбалансированным грузом 4 контейнер 1 совершает колебательные движения в двух плоскостях. Частота колебаний — 50...180 кГц. При этом происходят колебания в двух плоскостях и

медленное вращение всей массы рабочей среды заготовок. В рабочей среде детали расположены хаотично и занимают случайное положение, что обеспечивает равномерную обработку всех поверхностей. Большое количество микроударов поддерживает заготовки во взвешенном состоянии, исключая образование грубых забоин и повреждений. Обработка может протекать всухую или с подачей жидкого раствора, который обеспечивает удаление продуктов изнашивания, равномерное распределение заготовок по объему контейнера и химико-механический процесс съема металла.

В состав рабочей среды входят:

- **твердый наполнитель** в виде абразивных зерен (абразивная крошка, шлифовальное зерно, галька, известняк, гранит и др.), состав и зернистость которого зависят от вида обработки и требований к качеству обработанной поверхности;
- **неабразивные материалы** (предметы различной формы из металла, древесины, войлока, кожи, резины). При полировании всухую используются войлочные, фетровые или кожаные материалы со слоем пасты и введением химических веществ, интенсифицирующих процесс. Наносятся паста ГОИ, пасты из порошков (оксид хрома, крокус, венская известь и др.), растворенных в керосине, скипидаре, водном растворе аммиака;
- **жидкий наполнитель** с моющими, разделительными, травящими, пассивирующими, блескообразующими и другими добавками. При обработке заготовок из черных металлов используется мыльный или мыльно-содовый раствор с добавкой 0,5...1 % олеиновой кислоты, при обработке заготовок из меди и медных сплавов — водный раствор зеленого мыла со стеариновой кислотой, при сухой обработке — сжатый воздух.

Вибрационное полирование производится последовательно в нескольких различных рабочих средах. Например, при обработке заготовок из конструкционных сталей и чугуна применяется следующий технологический маршрут:

- **черновое шлифование.** Рабочая среда: обкатанные куски шлифовальных кругов зернистостью 10—60, твердостью ВТ, крупностью 25...30 мм, 20%-ный раствор кальцинированной соды. Режимы обработки: частота колебаний 9...12 кГц, амплитуда 5...6 мм. Продолжительность обработки 120...300 мин с промывкой 2%-ным содовым раствором;
- **чистовое шлифование.** Рабочая среда: абразивная крошка, бой керамических кругов из электрокорунда, карбида кремния зернистостью 4—8, твердостью ВТ—ЧТ, крупностью 25...30 мм. Контейнер заполняется рабочей средой на 50 %, закладываются

ся заготовки на 75 % объема контейнера. Режимы обработки: частота колебаний 12 кГц, амплитуда 4 мм. Продолжительность обработки 120...300 мин с промывкой 2%-ным содовым раствором;

- **полирование.** Рабочая среда: абразивная крошка, бой керамических кругов из белого электрокорунда, зеленого карбида кремния, зернистостью М28, твердостью ВТ—СТ, крупностью 25...30 мм. Контейнер заполняется рабочей средой на 50 %, закладываются заготовки на 75 % объема контейнера. Режимы обработки: частота колебаний 12 кГц, амплитуда 2,5...3 мм. Продолжительность обработки 120...300 мин с промывкой 2%-ным содовым раствором;
- **окончательное полирование.** Рабочая среда: войлочные пыжи и обрезки отходов войлочных кругов размерами 10...10 мм, шаржированные порошком абразива. Контейнер заполняется рабочей средой на 60 %, закладываются заготовки на 75 % объема контейнера. Режимы обработки: частота колебаний 12 кГц, амплитуда 2,5...3 мм. Продолжительность обработки 120...300 мин до получения зеркального блеска.

Состав рабочих сред для разных видов обработки приведен в табл. 7.8.

Магнитно-абразивное полирование. Данному виду обработки подвергаются плоские, цилиндрические или фасонные поверхности заготовок из магнитных и немагнитных материалов. За 10...40 с достигается шероховатость обработанной поверхности Ra 0,032...0,2 мкм, исправляются погрешности геометрической формы.

Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в следующем. Заготовкам, помещенным в магнитное силовое поле, сообщают вращательное движение вокруг оси и осциллирующее движение вдоль оси. Возбуждаемый в сердечниках электромагнита поток пронизывает заготовки в диаметральной направленности. В контейнер с заготовками подается порошок, обладающий абразивными и магнитными свойствами, и СОТС. Магнитное поле выполняет роль связки, формирующей из отдельных абразивных зерен эластичный абразивный инструмент. Оно обеспечивает силовое воздействие, с помощью которого абразиву сообщаются нормальные и тангенциальные силы резания. СОТС — носитель поверхностно-активных веществ. В зоне обработки возникает процесс электролиза. Анодное растворение поверхностного слоя заготовок интенсифицирует процесс обработки, анодное растворение поверхностных слоев абразива обеспечивает их самозатачиваемость.

Таблица 7.8. Рабочие среды

Состав и характеристика рабочей среды		Операция обработки	Материал заготовки
Твердый наполнитель	Жидкий раствор		
Абразивная крошка 24А зернистостью 8—16 на керамической связке твердостью Т—ЧТ	Содовый, хромовый ангидрид	Снятие небольших заусенцев, скругление острых кромок, чистовое шлифование	Сталь, чугун, медные сплавы
Абразивная крошка 54С зернистостью 6—8 на керамической связке твердостью ВТ	Содовый или мыльный	Снятие небольших заусенцев, скругление острых кромок, полирование	Сталь, чугун, цветные сплавы, пластмассы
Фарфоровый бой с размером гранул 15...25 мм, войлочные пыжи 25×25×25 мм	20...30 г/л тринатрийфосфата технического, 10 г/л калия двуххромовокислого, 0,2...0,3 г/л моющего средства	Подготовка поверхности под гальваническое покрытие	Латунь
Дробленый гранит	Содовый или мыльный	Шлифование, полирование, снятие заусенцев, скругление кромок	Сталь, чугун, медные сплавы
Стальные закаленные и полированные шарики	Содовый или мыльный с добавлением 1 % олеиновой кислоты	Отделка, наклеп, удаление облоя, нанесение защитных пленок	Сталь, пластмассы
Древесная крошка с добавлением шлифовальных порошков	Всухую или при слабом увлажнении	Чистовое шлифование, полирование	Сталь, цветные металлы и сплавы
Войлочные пыжи и обрезки кожи со слоем пасты	Всухую	Полирование, глянцеование	Сталь, цветные металлы и сплавы

Рис. 7.17. Установка для магнитно-абразивной обработки:

1 — трафарет; 2 — кронштейн; 3 — токосъемник; 4 — шпиндель; 5 — оправка; 6 — контактное кольцо; 7 — электромагнитный индуктор; 8 — катушка электромагнита; 9 — заготовка; 10 — рабочая плита; 11 — прокладка; 12 — стол

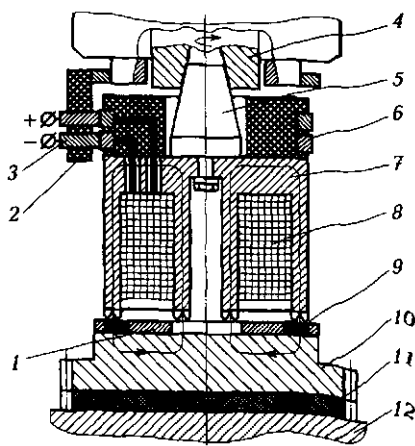


Схема установки для магнитно-абразивного полирования (МАП) показана на рис. 7.17. Между столом 12 станка и рабочей плитой 10 размещена немагнитная неэлектропроводная прокладка 11. На рабочей плите размещаются трафарет 1 и заготовки 9. На шпиндель 4 станка надета оправка 5 с корпусом электромагнитного индуктора 7 и катушками 8 электромагнита. Напряжение на катушки электромагнита подается через контактные кольца 6 токосъемником 3, установленным на кронштейне 2.

Магнитно-абразивное полирование происходит с подачей в зону обработки 5... 10%-ного раствора эмульсола марки Э-2 в воде. Абразивные порошки для МАП должны обладать высокой магнитной индукцией насыщения, магнитной проницаемостью, абразивными свойствами, теплопроводностью, химической стойкостью и низкой электропроводностью. Обычно применяются ферросплавы или смесь железных окатышей и тугоплавких соединений (TiC , Al_2O_3 , Cr_3C_2 , ZrC , W_2B_5 , WC).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие особенности процесса резания при шлифовании вы знаете?
2. С какой целью производят правку шлифовальных кругов?
3. Как хранить шлифовальные круги?
4. Расшифруйте характеристику шлифовального круга: 24Д 16 М2 В К5/ ПСС 40 15 тип 1 35 м/с.

5. Какие виды крепления хона вы знаете?
6. В каких случаях применяют суперфиниширование?
7. Каким инструментом притирают наружные цилиндрические поверхности?
8. Что понимается под термином «правка круга»?
9. Почему при хранении круга или при его установке на оправку недопустим его прямой контакт с другим кругом или с металлом оправки?
10. Почему недопустимо устанавливать скорость резания больше чем скорость, указанная на круге?

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК

В машиностроении технологические проблемы, связанные с обработкой новых конструкционных материалов и с повышенными требованиями к качеству обработки деталей, зачастую решаются применением электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФХО). Достоинствами этих методов являются малые силы обработки и простая кинематика станков, что позволяет обрабатывать материалы высокой твердости и прочности, резко уменьшить погрешность обработки, обрабатывать сложные фасонные внешние и внутренние поверхности, отверстия малых диаметров и т. п.

8.1. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

Электроэрозионная обработка основана на разрушении (эрозии) поверхности заготовки, происходящем в результате теплового воздействия импульсов электрического разряда, которые возникают между электродами (инструментом и заготовкой), погруженными в жидкий диэлектрик (например, керосин, минеральное масло). Во время электрического разряда выделяется большое количество теплоты, идущее на плавление, частичное испарение и выброс частиц с поверхности заготовки. В течение $10^{-8} \dots 10^{-5}$ с плотность тока возрастает до $8 \dots 10$ кА/мм², температура на поверхности заготовки увеличивается до 12 000 °С. При этом удаляется слой толщиной 1...10 мкм. Поскольку электрический разряд происходит по кратчайшему пути, прежде всего удаляются выступы микронеровностей. При сближении инструмента и заготовки изменяется макро- и микрогеометрия обрабатываемой поверхности — поверхность заготовки принимает форму поверхности инструмента.

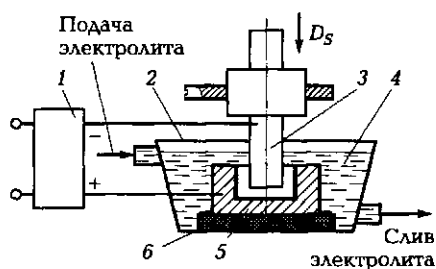


Рис. 8.1. Электроискровая обработка:

1 — генератор; 2 — ванна; 3 — инструмент; 4 — диэлектрическая жидкость; 5 — заготовка; 6 — подставка-изолятор; D_s — движение подачи

Электроискровая обработка. Данный метод обработки основан на использовании импульсного искрового разряда между анодом (заготовкой) и катодом (инструментом). Принципиальная схема процесса показана на рис. 8.1. В ванне 2 с диэлектрической жидкостью 4 размещены подставка-изолятор 6 и заготовка 5. Между заготовкой и инструментом 3 пропускается импульсный ток амплитудой 100...200 В. Импульс продолжительностью 20...200 мкс генерируется генератором 1. В зависимости от энергии импульса различают обработку на особо мягких, мягких, средних и жестких режимах. Мягкие режимы позволяют вести обработку с размерной точностью до 2 мкм и шероховатостью обработанной поверхности до Rz 0,32 мкм. Обработка на средних и жестких режимах позволяет получать цилиндрические отверстия с радиусной осью, фасонные открытые полости (полость штампа), прошивать сквозные отверстия любой поперечной формы диаметром 1...50 мм, разрезать заготовку и т.д. Обработка на особо мягких режимах позволяет шлифовать внутреннюю поверхность особо точных отверстий малого диаметра (фильер) и окончательно отделывать заготовку. Электроискровая обработка применяется для изготовления штампов, пресс-форм, фильер, режущего инструмента, деталей топливной аппаратуры двигателей, сеток, сит и др.

Высокочастотная электроискровая обработка. Этот метод основан на подаче между заготовкой и инструментом высокочастотных импульсов (100...150 кГц) малой энергии. Производительность высокочастотной обработки в 30—50 раз выше, чем электроискровой. Одновременно улучшаются точностные параметры обработанной поверхности и увеличивается стойкость инструмента. Метод применяется при обработке заготовок из твердых сплавов и для чистовой отделки заготовок.

Электроимпульсная обработка. Сущность метода заключается в том, что полярный эффект при импульсах малой и средней продолжительности приводит к повышенной эрозии анода. При импульсах большой продолжительности (дуговой разряд) значительно быстрее разрушается катод. Поэтому при электроимпульсной обработке анодом является инструмент, а катодом — заготовка. В качестве источника энергии используется электромашинный или электронный генератор. Продолжительность импульсов составляет 500... 10 000 мкс.

Наиболее целесообразно применять метод для предварительной обработки фасонных наружных полостей, фасонных отверстий в деталях из твердых сплавов, жаропрочных, высокопрочных или нержавеющей сталей.

Электроконтактная обработка. Метод заключается в локальном нагреве заготовки в месте ее контакта с инструментом (электродом) и удалении размягченного или расплавленного материала из зоны обработки при перемещении инструмента. Источником теплоты является импульсный дуговой разряд амплитудой 20... 40 В. В качестве инструмента применяется вращающийся чугунный или медный диск.

Электроконтактную обработку применяют при черновом сверлении, точении заготовок, разрезании слитков. Метод не обеспечивает большой точности, но имеет высокую производительность.

8.2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Электрохимическая обработка основана на анодном растворении при электролизе. При прохождении постоянного электрического тока через электролит на поверхности анода (заготовки) протекает химическая реакция, поверхностный слой превращается в новое химическое соединение, переходит в электролит или оседает на дно и удаляется механическим способом.

Схема электрохимического полирования показана на рис. 8.2. Обработка ведется в ванне 1, заполненной электролитом 2. Заготовка 3 подключается к аноду. Катодом 4 служит пластина из свинца, стали или меди.

В зависимости от вида обрабатываемого материала в качестве электролита применяют растворы кислот или щелочей. При подаче напряжения начинается процесс растворения выступов 6 ми-

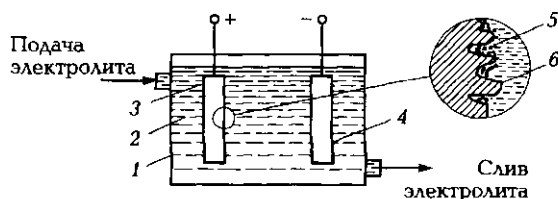


Рис. 8.2. Электрохимическая обработка:

1 — ванна; 2 — электролит; 3 — заготовка; 4 — катод; 5 — продукты электролиза; 6 — выступы микронеровностей

кронеровностей заготовки. Впадины микронеровностей заполняются продуктами электролиза 5, что препятствует их растворению. В результате уменьшается шероховатость поверхности, поверхность приобретает металлический блеск, при этом структура поверхностных слоев не изменяется. Способ используется для полирования сложных фасонных поверхностей, при подготовке заготовки под гальваническое покрытие.

8.3. ЭЛЕКТРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Особенностью способа является использование в качестве электрода абразивного инструмента на электропроводной связке (бакелитовая связка с графитным наполнителем). Между заготовкой 1 — анодом (рис. 8.3) и абразивным инструментом 5 — катодом подается электролит 3. Пространство между обрабатываемой

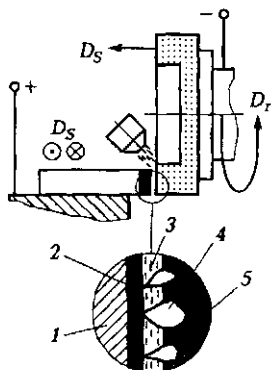


Рис. 8.3. Электроабразивная обработка:

1 — заготовка; 2 — обрабатываемая поверхность; 3 — электролит; 4 — абразивное зерно; 5 — абразивный инструмент; D_r — главное движение; D_s — движение подачи

поверхностью 2 и абразивными зернами 4 заполнено электролитом (межэлектродный зазор).

Абразивному инструменту и заготовке сообщают движения, аналогичные движениям при абразивной обработке. Большая часть припуска (85...90 %) удаляется за счет анодного растворения, остальное — абразивными зернами. Метод применяют при наружном, внутреннем, плоском и цилиндрическом шлифовании, алмазном хонинговании труднообрабатываемых материалов, при обработке нежестких заготовок.

8.4. АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Данный способ представляет собой сочетание электротермической и электрохимической обработки. Заготовку подключают к аноду, а инструмент — к катоду. В рабочую зону подают электролит (водный раствор жидкого натриевого стекла). В качестве инструмента применяют медные, свинцовые или стальные диски, проволоку, пластины. В процессе обработки происходит одновременное анодное растворение и электроэрозия микронеровностей обрабатываемой поверхности.

Анодно-механическая обработка применяется для разрезания заготовок (рис. 8.4, а), точения фасонных поверхностей (рис. 8.4, б) и в сочетании с другими методами механической обработки. Процесс эффективен при обработке сложных фасонных заготовок, нежестких заготовок, труднообрабатываемых материалов.

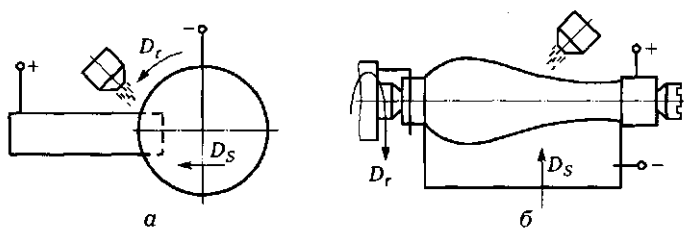


Рис. 8.4. Анодно-механическая обработка:

а — разрезание; б — точение; D_r — главное движение; D_s — движение подачи

8.5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

Ультразвуковая обработка (УЗО) основана на явлении магнитострикции, т.е. способности сердечника из ферромагнитных материалов изменять свои размеры под воздействием переменного магнитного поля. Этим эффектом обладают никель, железокобальтовые и железоалюминиевые сплавы, феррит.

Принципиальная схема УЗО показана на рис. 8.5. Заготовку 8 помещают в ванну 9, заполненную абразивной суспензией 7. К заготовке подводят инструмент — пуансон 10, закрепленный на торце концентратора 4. Концентратор расположен в магнитострикционном сердечнике 1, установленном в кожухе 11. Через кожух пропускают охлаждающую жидкость.

Колебания сердечника возбуждаются с помощью генератора ультразвуковой частоты 2 (частота 16...30 кГц, амплитуда колебаний 5...10 мкм) и источника постоянного тока 3. Абразивную суспензию прокачивают через систему «ванна 9 — резервуар 6 — насос 5».

Концентратор увеличивает амплитуду колебаний до 40...60 мкм. Колебательные движения инструмента передаются абразивным

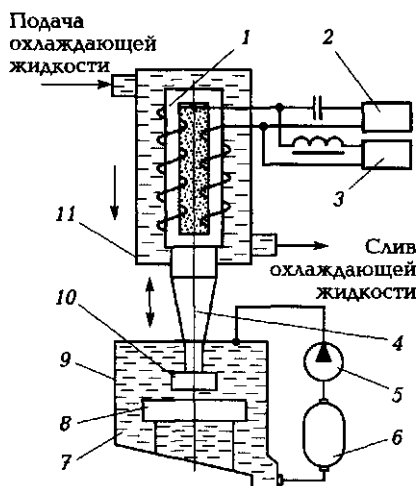


Рис. 8.5. Ультразвуковая обработка:

1 — сердечник; 2 — ультразвуковой генератор; 3 — источник постоянного тока; 4 — концентратор; 5 — насос; 6 — резервуар; 7 — абразивная суспензия; 8 — заготовка; 9 — ванна; 10 — пуансон; 11 — кожух

зернам суспензии. В результате соударений об обрабатываемую поверхность абразивные зерна скалывают микрочастички материала заготовки. Большое число соударений (до $30\,000\text{ с}^{-1}$) и кавитация обуславливают интенсивное разрушение поверхностного слоя заготовки.

Данный способ применяется для обработки сквозных и глухих отверстий различного поперечного сечения, фасонных полостей, разрезания заготовок и др. С помощью УЗО обрабатывают хрупкие твердые материалы: стекло, керамику, твердые сплавы, кремний, кварц, алмазы, цементированные, азотированные и закаленные стали.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем сущность электроэрозионной обработки?
2. Какие процессы лежат в основе электрохимической обработки?
3. Зачем нужен концентратор в установке для ультразвуковой обработки?

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕЗ СНЯТИЯ СТРУЖКИ

Обработка поверхностей заготовок без снятия стружки основана на пластическом деформировании поверхностных слоев, в результате чего обеспечивается низкая шероховатость и необходимые физико-механические свойства поверхностей заготовок. Уменьшение шероховатости сопровождается смятием выступов микронеровностей. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) сопровождается упрочнением обработанной поверхности — наклепом, в результате повышаются все характеристики сопротивления металла деформации, уменьшается его пластичность и увеличивается твердость. В процессе ППД кристаллы сплющиваются в направлении деформации, образуется упорядоченная структура (текстура) волокнистого характера. Упрочнение металла в незакаленных сталях происходит за счет структурных изменений и уменьшения несовершенств (рыхлости, уменьшение дислокаций, дробление зерен и т.д.). При упрочнении закаленных сталей, кроме того, идет частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит. Интенсивность наклепа тем выше, чем мягче сталь. Наибольшее повышение твердости наблюдается в аустенитных сталях, наименьшее — у сталей с избыточным ферритом. Поверхность, обработанная ППД, становится более долговечной и износостойкой.

9.1. ОБКАТЫВАНИЕ И РАСКАТЫВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВКИ

Обкатыванием и раскатыванием упрочняют наружные и внутренние цилиндрические, фасонные и плоские поверхности. Сущность процесса заключается в силовом воздействии на поверх-

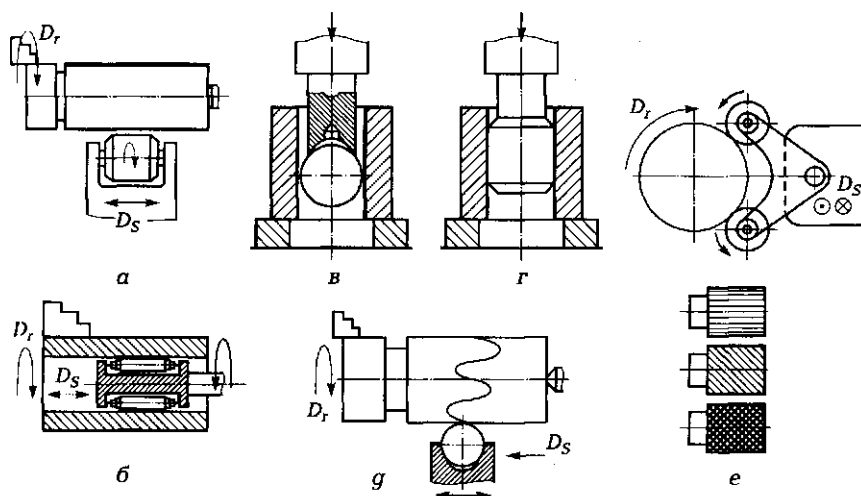


Рис. 9.1. Схемы обработки заготовок без снятия стружки:

а — обкатывание; б — раскатывание; в — калибрование отверстия; г — дорнование; д — вибронакатывание; е — накатывание рифлений; D_r — главное движение; D_s — движение подачи

ность заготовки инструментом высокой твердости. В качестве инструмента используют твердосплавные или закаленные ролики (рис. 9.1, а) и шарики или кристалл алмаза. Давление осуществляется только в зоне контакта инструмента с заготовкой. За счет вращения заготовки и движения подачи пятно контакта перемещается, и вся обрабатываемая поверхность оказывается пластически деформированной. Для уменьшения трения и задиров в зону обработки подают машинное масло. Наиболее совершенным является обкатывание (раскатывание) несколькими роликами (рис. 9.1, б), особенно при установке роликов на упругих элементах, наименее производительным — обкатывание шариком. Метод достаточно просто реализуется на универсальных токарных станках: в резцедержатель (в пиноль задней бабки) достаточно установить оправку с обкатным инструментом.

9.2. КАЛИБРОВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Калибрование — перемещение с натягом в отверстиях жесткого инструмента. Инструмент сглаживает микронеровности, упрочняет поверхность, повышает размерную точность. Простейшим

инструментом является шарик (рис. 9.1, в), проталкиваемый штоком пресса. При использовании оправки с закаленным роликом (дори) инструмент проталкивается сквозь отверстие (рис. 9.1, г) аналогично действию прошивки. Инструмент не обладает большой стойкостью, однако метод широко применяется вследствие простоты инструмента, оснастки и наладки.

9.3. ВИБРОНАКАТЫВАНИЕ

Для повышения износостойкости заготовок целесообразно на поверхностях трения выдавливать неглубокие канавки, в которых размещается смазка. Канавки выполняют вибронакатыванием (рис. 9.1, г). Инструмент (шарик или алмазный карандаш) устанавливают в резцедержателе и придают ему движение подачи и дополнительное движение от вибратора. Изменяя амплитуду и частоту колебаний вибратора, получают требуемый рисунок на обработанной поверхности.

9.4. НАКАТЫВАНИЕ РИФЛЕНИЙ

Методами ППД можно нанести различные рифления на поверхность заготовки. На рис. 9.1, е показаны схема и виды рифлений. Обкатку с рифлеными роликами устанавливают в резцедержателе, а заготовку — в рабочем приспособлении токарного станка. Ролики внедряются в обрабатываемую поверхность и перемещаются вдоль заготовки. Крестовое рифление получают двумя роликами с разнонаправленными рифлениями.

9.5. УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ

Упрочнение поверхностей заготовки методами ППД возможно с применением свободного инструмента (дробеструйная обработка), ударного или виброинструмента. Эти способы основаны на концентрированном (ударном) воздействии инструмента на обрабатываемую поверхность. Удар производится по очень маленьким площадкам, в результате чего создается большое местное давление. Зоны, воспринявшие удар, располагаются близко друг к другу, поэтому вся обработанная поверхность оказывается наклепанной.

При дробеструйной обработке заготовку подвергают ударному воздействию потока дробы, которую изготавливают из отбеленного чугуна, стали, алюминия, стекла. Заготовки помещают в закрытую емкость. Дробь под воздействием потока воздуха (или за счет центробежных сил во вращающейся емкости) с большой скоростью ударяет о заготовки. Исходная шероховатость при этом не изменяется, происходит только наклепывание поверхности. Данным способом упрочняют пружины, рессоры, штоки и др.

Цилиндрические или плоские поверхности можно упрочнять ударным инструментом — шариками, установленными во вращающемся сепараторе. Аналогичный эффект упрочнения возникает от воздействия на поверхность частых ударов сферических или плоских бойков (виброинструмент).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как изменяется качество поверхности после обработки методами поверхностного пластического деформирования?
2. Что такое калибрование отверстий?

ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением (ОМД) основана на свойстве пластичности металлов, т.е. на их способности воспринимать под действием внешних сил остаточную деформацию без нарушения целостности материала заготовки.

Все процессы ОМД можно условно разделить на процессы, завершающие металлургический цикл (прокатка, прессование, волочение), и процессы производства заготовок (ковка, горячая штамповка, холодная объемная штамповка, листовая штамповка и др.). В настоящем учебнике рассматриваются только процессы производства заготовок.

10.1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОМД

В результате взаимодействия инструмента и заготовки изменяются размеры последней, происходит ее деформация. При механическом воздействии на тело происходит повышение потенциальной энергии кристаллической решетки, и атомы отклоняются от положения устойчивого равновесия. После снятия воздействия напряженное состояние тела исчезает, атомы стремятся вернуться в исходное состояние. Если размеры тела восстанавливаются, деформация называется упругой. В этом случае зависимость «напряжение — деформация» выражается законом Гука: $\sigma = E\varepsilon$, где ε — относительное удлинение; E — модуль упругости. При увеличении нагрузки выше предела пропорциональности (см. рис. 1.12), кроме упругой деформации, происходит пластическая (необратимая) деформация, которая полностью не исчезает — существует частичное упругое восстановление (пружинение) тела. Пластическая деформация поликристалла происходит путем скольжения внутри зерен, а также направленного перемещения атомов, поворота и относительного перемещения зерен. Скольжение — необ-

ратимое перемещение атомов внутри кристалла под действием сдвигающего напряжения. Оно происходит по плоскости (плоскость скольжения), включающей в себя наибольшее число атомов кристалла. Современная физика объясняет скольжение на основе теории дислокаций. Установлено, что кроме имеющихся (см. рис. 1.2) в процессе деформаций образуются новые дислокации. С увеличением сдвигающих напряжений дислокации в экстраплоскости 4—5 (см. рис. 1.2, б) волнообразно перемещаются по плоскости ММ. Следовательно, пластичность — это свойство не только деформируемого металла, но и его чистоты и наличия в нем дефектов кристаллической решетки.

Пластическая деформация поликристалла сопровождается деформационным упрочнением, при этом изменяются структура и свойства металла. Зерна вытягиваются в направлении наибольшей деформации растяжения, структура становится волокнистой, происходит процесс упорядоченного расположения зерен — текстура, появляется анизотропия свойств. Прочность на растяжение и сжатие вдоль волокон больше, чем поперек, а сопротивление срезу поперек волокна больше, чем вдоль. Происходит накопление дефектов металла, что является причиной повышения твердости, прочности, уменьшения пластичности.

Если упрочненное тело нагреть, идет процесс, обратный упрочнению, — **разупрочнение**. При низкотемпературном отжиге уменьшаются остаточные напряжения, увеличивается пластичность, незначительно уменьшается твердость. Полное разупрочнение наступает при рекристаллизационном отжиге. Для обычных металлов температура начала рекристаллизации $T_{н.р} = (0,3 \dots 0,6) T_{пл}$.

Рассмотрим часть диаграммы «железо—углерод» (рис. 10.1). При нагреве сплава выше линии солидуса появляется жидкая фаза, следовательно, в этой области сплав не годится для ОМД (пережог). Ниже зоны пережога находится зона перегрева, выражающаяся ростом аустенитных зерен, крупнозернистой структурой, что также недопустимо для ОМД. Однако перегрев металла исправим отжигом или нормализацией. Выше линии GSE находится область горячей ОМД, ниже этой линии — область холодной ОМД.

Нагрев заготовок для горячей ОМД осуществляют в пламенных (используя газ или мазут) или электрических печах. Мелкие заготовки нагревают в мелких камерных (площадью до 2,5 м²) пламенных печах. Крупные заготовки нагревают в крупных камерных (регенеративных) печах или в методических печах, имеющих уд-

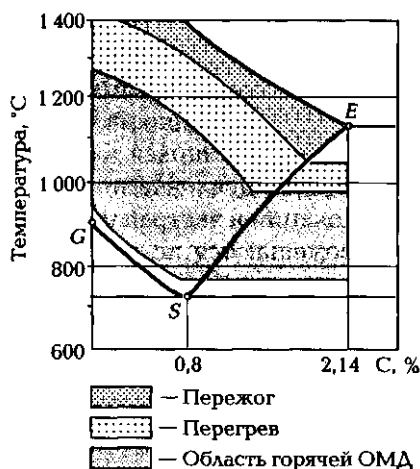


Рис. 10.1. Интервалы температур горячей ОМД:

S, G, E — точки диаграммы «железо — углерод», соответствующие температуре 727, 911, 1147 °C

линенный поддон. Заготовки, поступая в такую печь, постепенно проталкиваются в горячую зону, что обеспечивает их равномерный нагрев. При использовании электрических печей отсутствует угар и обеспечивается равномерность нагрева заготовок.

10.2. КОВКА

Ковка — процесс горячего пластического деформирования металла универсальным инструментом — бойком при свободном течении металла. Ковкой получают поковки массой от 0,1 кг до 400 т. Различают ковку ручную и машинную. Ковка — процесс универсальный, не требующий сложного дорогостоящего оборудования и оснастки, но требующий высокой квалификации оператора (кузнеца). Данный процесс малопроизводительный, поковки имеют низкую размерную точность, высокую шероховатость и геометрические погрешности. Основная область примененияковки — единичное и мелкосерийное производство.

К основным операциямковки относятся:

- **осадка** — уменьшение высоты заготовки при увеличении ее диаметра (рис. 10.2, а). Осадку применяют для получения поволовок типа «диск», как предварительную операцию перед прошивкой, при изготовлении пустотелых заготовок, для уничтожения литой дендритной структуры, измельчения зерна. Осадкой не рекомендуется деформировать заготовки при отношении высоты к диаметру более 2,5;

- *высадка* — осадка металла на части длины заготовки (рис. 10.2, б);
- *протяжка* — удлинение заготовки или ее части (*разгонка*) за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 10.2, в). Протяжку производят последовательными ударами плоского или вырезного бойка по отдельным участкам заготовки с подачей последней вдоль оси протяжки и переворотом (при необходимости) на 90° . При каждом ударе уменьшается высота, одновременно увеличиваются ширина и длина заготовки. При перевороте заготовки последующие удары устраняют уширение

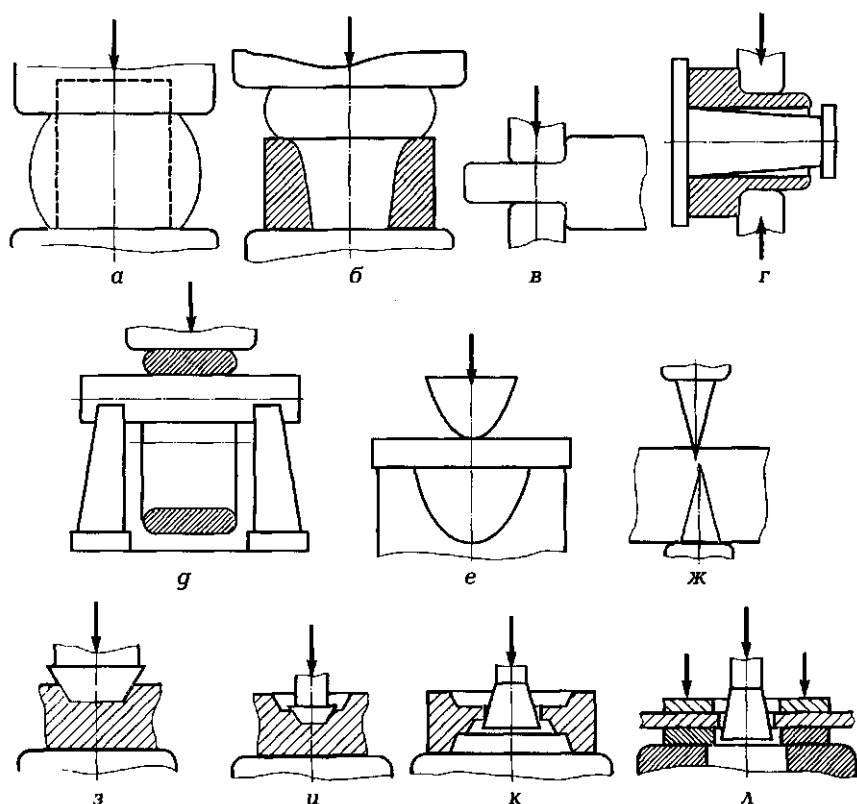


Рис. 10.2. Основные приемыковки:

а — осадка; б — высадка; в — протяжка; г — протяжка с оправкой; д — раскатка на оправке; е — гибка; ж — отрубка; з — прошивка неглубоких полостей; и — прошивка глубоких полостей; к — прошивка сквозных полостей; л — высадка с подкладкой

заготовки. При протяжке цилиндрических заготовок плоскими бойками в центре удара появляются значительные растягивающие напряжения и возможно появление трещин. При протяжке заготовок вырезными бойками силы, направленные с четырех сторон, способствуют более равномерному течению металла, что устраняет возможность появления осевых трещин;

- *протяжка с оправкой* — увеличение длины пустотелой заготовки за счет уменьшения толщины стенок (рис. 10.2, г). Протяжку выполняют в вырезных бойках с установкой заготовки на коническую оправку;
- *раскатка на оправке* — одновременное увеличение наружного и внутреннего диаметров заготовки за счет уменьшения толщины ее стенок (рис. 10.2, г);
- *гибка* — придание заготовке изогнутой формы по заданному контуру (рис. 10.2, е). При гибке необходимо учитывать пружинение заготовки, искажение ее поперечного сечения (утяжка), возможность образования складок по внутреннему радиусу;
- *отрубка* — отделение части заготовки по незамкнутому контуру (рис. 10.2, ж). Отрубку производят топорами различной формы;
- *скручивание* — поворот части заготовки вокруг ее оси;
- *прошивка* — получение полостей в заготовке. Неглубокие полости получают за один проход (рис. 10.2, з), глубокие — за два и более проходов (рис. 10.2, и), сквозные — за несколько проходов с переворотом заготовки (рис. 10.2, к). В тонких заготовках сквозные отверстия получают *высадкой с подкладкой* (рис. 10.2, л). Небольшие партии заготовок со сложной конфигурацией куют в *подкладных штампах*. Подкладной штамп состоит из одной или двух частей, в которых выполнена полость, соответствующая конфигурации поковки.

Оборудование для машиннойковки и штамповки можно разделить на две группы: машины статического действия (пневматические или гидравлические прессы) и машины динамического действия (молоты).

10.3. ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

Объемная штамповка — процесс холодного или горячего пластического деформирования металла в полости специального инструмента — штампа. Штамп состоит из двух или нескольких частей, которые в сомкнутом состоянии образуют одну или несколь-

ко полостей (ручьев). При сближении частей штампа происходит принудительное перераспределение металла заготовки по ручью. Объемная штамповка — высокопроизводительный процесс, обеспечивающий высокую размерную точность заготовки, стабильность ее формы и размеров, уменьшение технологических припусков на последующую обработку (в некоторых случаях возможность обойтись без снятия стружки, получение поковок сложной формы, возможность частичной автоматизации процесса). Однако штамп — сложная, дорогостоящая узкоспециальная оснастка, поэтому область применения объемной штамповки — среднесерийное и массовое производство.

Существует два основных вида объемной штамповки: горячая и холодная.

10.3.1. Горячая штамповка

Температурная область горячей штамповки приведена на рис. 10.1. Технологический процесс горячей штамповки включает разделку исходного материала на заготовки, нагрев заготовок, штамповку, первичную термообработку и отделку поковок. Наиболее распространена штамповка из мерной заготовки, отрезанной в штампе из прутка, имеющей заданные размеры и массу. Собственно формоизменение заготовки производится в открытых или в закрытых штампах.

В открытых штампах (рис. 10.3, а) получают сложные по форме штамповки. При сближении половинок штампа 1 и 5 металл заготовки 2 течет перпендикулярно движению частей штампа, расте-

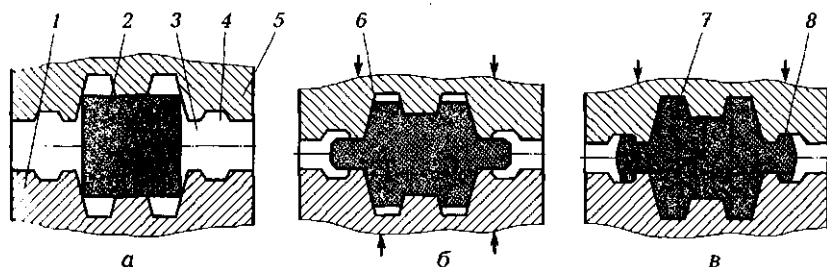


Рис. 10.3. Штамповка в открытых штампах:

а — размещение заготовки в полости штампа; б — стадия получения поковки; в — стадия образования облоя; 1 и 5 — половинки штампа; 2 — заготовка; 3 — облойная канавка; 4 — магазин; 6 — ручей; 7 — изделие; 8 — облой

кается по ручью 6, образует готовое изделие 7 и затекает в облойную канавку 3. При смыкании половинок штампа излишек металла затекает в магазин 4, образуя облой 8. После штамповки облой обрезается на обрезных штампах. Коэффициент использования металла (КИМ) для деталей типа крестовины равен 0,5...0,8. Для этих деталей можно повысить значение КИМ, применяя малоотходную штамповку (рис. 10.4). Сборные матрицы 1, установленные в матрицедержателях 3, образуют канавки, в которые под давлением ползунов 2 течет металл.

Штамповка в закрытых штампах (рис. 10.5) не предусматривает образование облоя. Весь объем заготовки идет на образование штамповки, но требуется точное соответствие объемов заготовки и штамповки, в противном случае возможна недоштамповка или перегрузка штампа или оборудования.

Для штамповки применяют кривошипные горячештамповочные прессы (ГКШП), горизонтальные ковочные машины (ГКМ), гидравлические прессы, динамические машины и т. д. На ГКШМ возможно применять прямое, обратное и другие виды выдавливания. При прямом выдавливании (рис. 10.6, а) металл течет в направлении перемещения ползуна 1; при обратном выдавливании (рис. 10.6, б) металл течет навстречу ползуну. Штамповка выполняется с минимальными уклонами, так как удаляется из штампа выталкивателем 2. Штамп для ГКМ (рис. 10.7) состоит из трех частей: неподвижной 3 и подвижной 2 матриц и пуансона 1.

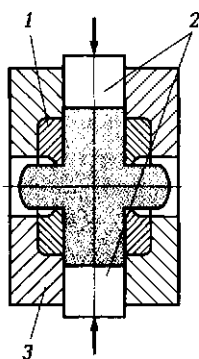


Рис. 10.4. Малоотходная штамповка:

1 — сборная матрица; 2 — ползун;
3 — матрицедержатель

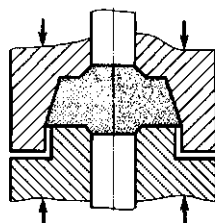


Рис. 10.5. Штамповка заготовок в закрытых штампах

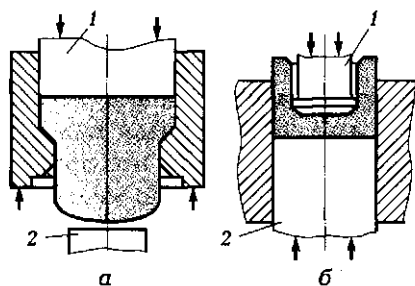


Рис. 10.6. Выдавливание:

а — прямое; *б* — обратное; 1 — ползун; 2 — выталкиватель

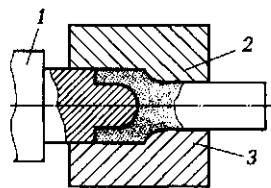


Рис. 10.7. Штамповка на ГКМ:

1 — пуансон; 2 — подвижная матрица; 3 — неподвижная матрица

Пруток нагретым концом укладывается в неподвижную матрицу, подвижная матрица зажимает пруток. Образуется полость штампа. При движении пуансона формируется головка штамповки. Для изготовления штамповок несложной формы (звенья цепей, рычаги и др.) применяют штамповку в ковочных вальцах (рис. 10.8). Нагретую заготовку подают до упора 1 в момент, когда вальцы 2 расходятся. При повороте валков заготовка захватывается, происходит ее обжатие по форме полости, и заготовка выталкивается.

Отделка штамповок включает в себя обрезку заусенца и облоя, очистку штамповки от окалины, пробивку перегородок в сквозных полостях (см. рис. 10.2, к), калибровку и правку штамповок. Калибровка плоскостная (рис. 10.9, а) осуществляется для получения

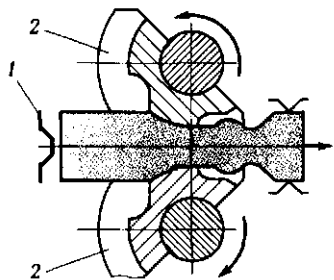


Рис. 10.8. Штамповка в ковочных вальцах:

1 — упор; 2 — вальцы

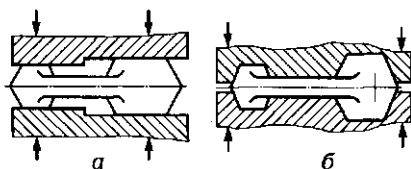


Рис. 10.9. Калибровка:

а — плоскостная; *б* — объемная

точных вертикальных размеров. Объемная калибровка (рис. 10.9, б) повышает точность размеров поковки и улучшает качество ее поверхности.

10.3.2. Холодная штамповка

Холодная объемная штамповка (ХОШ) — получение штамповок и деталей из сортового проката и прессованных прутков — основана на холодной деформации металла.

Основные операции ХОШ: выдавливание, высадка открытая (рис. 10.10, а) и закрытая (рис. 10.10, б), вдавливание (рис. 10.10, в).

Высадку применяют для получения местных утолщений у ступенчатых заготовок (болты, винты, заклепки, шаровые пальцы, штуцеры).

При ХОШ применяют все виды выдавливания: прямое, обратное, поперечное, комбинированное и радиальное.

Основными особенностями ХОШ являются высокая сила деформирования заготовки (более 2,5 ГПа) и малая стойкость инструмента. Поэтому ХОШ подвергают сплавы с низким сопротивлением деформации (медные, алюминиевые, низкоуглеродистые и малолегированные стали). Исходную заготовку (обычно калиброванный сортовой прокат) перед ХОШ отжигают, очищают от окислов и загрязнений, смазывают.

Холодная объемная штамповка позволяет получать упрочненные заготовки без надрезов волокон, с большим сопротивлением динамическим нагрузкам, повысить КИМ (до 0,95), обеспечить высокую размерную точность и низкую шероховатость поверхности заготовки.

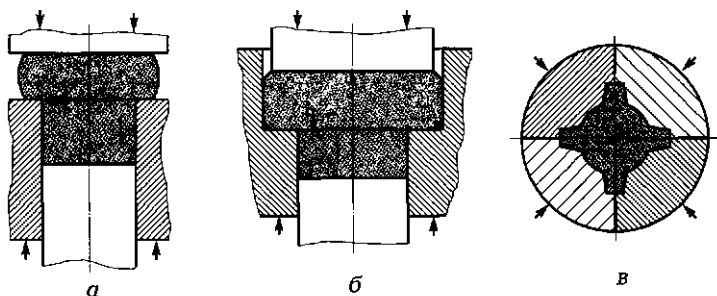


Рис. 10.10. Основные операции холодной объемной штамповки:

а — открытая высадка; б — закрытая высадка; в — вдавливание

10.3.3. Листовая штамповка

Листовая штамповка (ЛШ) — способ изготовления плоских и полых изделий с помощью штампов полос, листов, лент из углеродистых и легированных сталей, цветных сплавов. Исходным материалом служит тонколистовой прокат. При толщине стального листа до 15 мм ЛШ происходит в холодном состоянии. При ЛШ сложных по форме деталей с глубокими полостями исходная заготовка должна обладать высокой пластичностью, мелкозернистой структурой, равномерной толщиной.

Расход материала при ЛШ зависит от раскроя, т.е. способа расположения заготовок по площади исходной заготовки. Нерациональный раскрой (рис. 10.11, а) дает много отходов, которые можно частично использовать (например, для изготовления секций ограждений). Малоотходный раскрой (рис. 10.11, б) дает меньше отходов. Наилучшим вариантом является конфигурация деталей, обеспечивающая безотходный раскрой (рис. 10.11, в).

Линейная штамповка включает в себя последовательное или совместное применение следующих операций: разделительные (отрезка, вырубка, пробивка) и формоизменяющие (гибка, вытяжка, формовка, обжим, отбортовка).

Отрезка — отделение части заготовки по незамкнутому контуру. Для отрезки поперек применяют ножницы с параллельными ножами (рис. 10.12, а) или наклонным ножом (гильотинные). Отрезку по ломаному или криволинейному контуру удобнее производить на роликовых ножницах с прямыми (рис. 10.12, б) или наклонными (рис. 10.12, в) ножами.

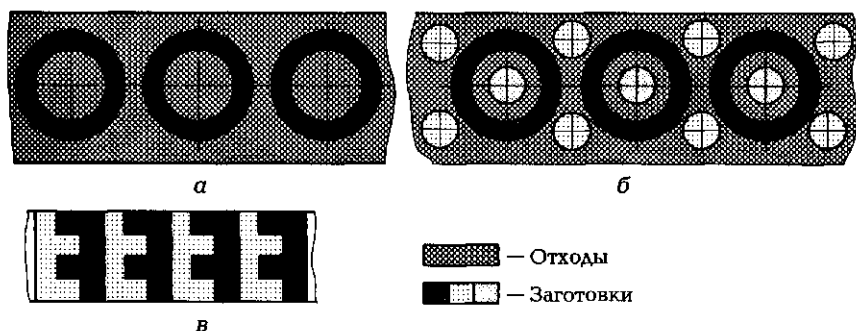


Рис. 10.11. Виды раскроя:

а — нерациональный; б — малоотходный; в — безотходный

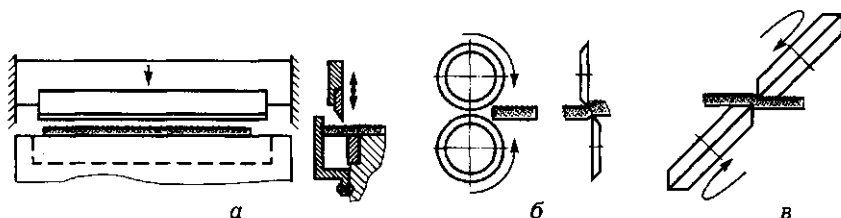


Рис. 10.12. Отрезка:

а — ножницами с параллельными ножами; *б* — роликовыми ножницами с прямыми ножами; *в* — роликовыми ножницами с наклонными ножами

Вырубка и пробивка — отделение части заготовки по замкнутому контуру (рис. 10.13, *а*). При вырубке отделяемая часть является изделием, при пробивке — отходом.

Гибка — изменение направления оси заготовки. Обычно гибка производится в холодном состоянии, поэтому следует учитывать значительное пружинение материала (необходимо увеличивать угол профиля штампа на 3...12° по отношению к требуемому углу изгиба) и появление напряжений сжатия на внутренней стороне линии изгиба и растяжения — на внешней (на внутренней стороне возможно появление утяжек, а на внешней — трещин).

Вытяжка — получение полых пространственных полуфабрикатов из плоских или полых заготовок протягиванием их через зазор между матрицей и пуансоном. Если этот зазор больше толщины заготовки — операцию называют *вытяжкой*, если зазор меньше толщины заготовки — *вытяжкой с утонением*. При вытяжке (рис. 10.13, *б*) плоская исходная заготовка под нажимом пуансона свертывается, образуя колпачок. Под воздействием тангенциальных напряжений во фланце может начаться складкообразование,

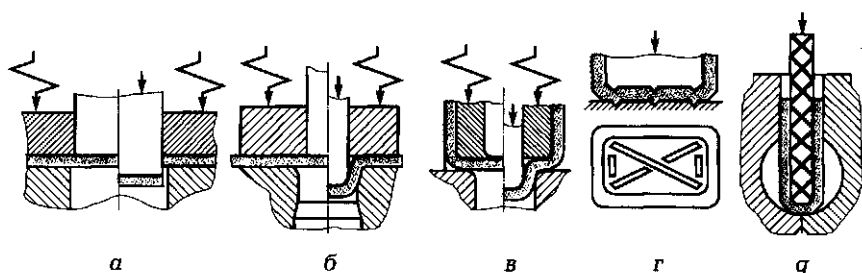


Рис. 10.13. Приемы листовой штамповки:

а — вырубка (пробивка); *б, в* — вытяжка; *г, г* — формовка

для предотвращения которого фланец прижимают к торцевой стороне матрицы. При повторной вытяжке (с промежуточным отжигом) можно получить более глубокий или ступенчатый колпачок (рис. 10.13, в). При вытяжке с утонением стенки заготовки вытягиваются, и их толщина будет меньше, чем у доньшка.

Формовка — изменение формы заготовки за счет местных деформаций растяжения. Частным случаем формовки является изготовление ребер жесткости (рис. 10.13, г), углублений, выступов, увеличение диаметра полости средней части вытянутого стакана с помощью резинового вкладыша (рис. 10.13, г), газа или жидкости под давлением.

Обжим — операция, при которой внутренней полостью матрицы обжимается часть стакана.

Отбортовка и разбортовка — образование борта по наружному контуру заготовки или по контуру ранее выполненного отверстия.

Таблица 10.1. Рекомендации по применению способов обработки металлов давлением

Способ получения заготовки	Характеристика получаемых заготовок
Ковка	
Ковка	Поковки: цилиндрические сплошные гладкие и с уступами (штоки, оси, валы, цапфы); прямоугольного сечения (платы, пластины, вкладыши и др.); со смешанными сечениями сплошные с уступами или с расположением отдельных частей в одной, двух и более плоскостях (коленчатые валы и т. п.); цилиндрические полые гладкие и с малыми уступами (диски, фланцы, колеса, муфты); с криволинейной осью (крюки, скобы, бугели, вилкообразные и т. д.)
Горячая штамповка	
Штамповка в открытых штампах	Масса заготовки 50... 100 кг; заготовки любой конфигурации
Штамповка в закрытых штампах	Масса заготовки 50... 100 кг; заготовки — тела вращения простой формы
Выдавливание и прошивка	Масса заготовки до 75 кг; валы гладкие, конические, ступенчатые; стержни с массивной головкой; втулки (стаканы) с глубокой глухой или сквозной полостью и односторонним фланцем

Способ получения заготовки	Характеристика получаемых заготовок
Штамповка в штампах с разъемными матрицами	Масса заготовки до 150 кг; заготовки сложной цилиндрической или иной формы, например с полостями в боковых стенках
Штамповка на горизонтально-ковочных машинах	Масса заготовки до 30 кг; стержни с головками или с утолщениями различной формы, полые, со сквозными или глухими отверстиями, фланцами, выступами; предпочтительна форма тел вращения
Гибка	Изогнутые в одной или нескольких плоскостях заготовки, получаемые из проката различного профиля
Вальцовка	Масса заготовки до 5 кг, длина — 50 ... 60 мм; заготовки переменного сечения (слесарный инструмент, шатуны, кулачки, звенья гусениц)
Радиальное обжатие	Сплошные и полые прямые заготовки удлиненной ступенчатой формы в виде тел вращения с цилиндрическими или коническими участками
Высадка на электровысадочных машинах (с одновременным контактным электронагревом)	Заготовки в виде стержней с массивными утолщениями (клапаны, валики с фланцами и т. п.)
Высадка на вертикально-ковочных машинах	Небольшие заготовки типа костылей, бородков, зубил, шинных гвоздей, веретен и т. д.
Раскатка	Заготовки типа колец диаметром 70 ... 700 мм при высоте 20 ... 200 мм из заготовок, штампованных на ГKM или кованных на молотах
Накатка зубьев	Цилиндрические (прямозубые, косозубые и шевронные), конические зубчатые колеса с модулем более 10 мм, диаметром до 600 мм
Поперечная прокатка	Заготовки удлиненной формы (ступенчатые валы, втулки)
Холодная объемная штамповка	
Выдавливание	Сплошные или пустотелые цилиндрические заготовки (поршневые пальцы, клапаны, колпачки, корпуса карданных подшипников и т. д.)

Способ получения заготовки	Характеристика получаемых заготовок
Высадка	Сплошные или полые заготовки типа тел вращения с утолщением (иногда содержащие небольшие элементы с двумя осями симметрии): болты, гайки, заклепки, ступенчатые валы, полые втулки
Радиальное обжатие	Ступенчатые и удлиненные заготовки из малопластичных сплавов; пустотелые заготовки со сложной конфигурацией внутренних поверхностей; заготовки с отверстиями малых диаметров на большой длине. Можно выполнять сборочные операции
Редуцирование	Сплошные и ступенчатые заготовки типа валов, осей, пальцев; метизы; шлицевые валы и др.

Рекомендации по применению тех или иных способов ОМД приведены в табл. 10.1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое деформация скольжения?
2. Перечислите основные операцииковки.
3. Что такое штамповка в открытых штампах?
4. Из каких частей состоит штамп для ГКМ?
5. Перечислите основные операции холодной объемной штамповки.
6. Как предотвратить складкообразование при вытяжке?

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Сварка — технологический процесс получения неразъемных соединений за счет образования межатомных или межмолекулярных связей на поверхностях соединяемых заготовок. Применение сварки позволяет упростить конфигурацию заготовок, увеличить количество и качество неразъемных единиц, снизить себестоимость конечного изделия. Для получения сварочного шва заготовки необходимо сблизить на расстояния, при которых начинают работать межатомные силы сцепления.

Различают два метода сварки: сварка давлением и сварка плавлением. При *сварке давлением* заготовки соединяются путем совместной пластической деформации поверхностей, при которой сминаются микронеровности, разрушаются и удаляются оксидные пленки, обеспечивается плотный контакт между заготовками и условия для действия межатомных сил. Для снижения сопротивления деформации зону сварки обычно нагревают. При *сварке плавлением* расплавляют кромки заготовок. При этом образуется общая сварочная ванна расплавленного металла, а после застывания — сварочный шов.

По виду и способу внесения в зону сварки дополнительной энергии различают сварку электрическую (все виды дуговой, электрошлаковая, контактная), химическую (газовая) и механическую (холодная, трением).

Свариваемость — способность материалов образовывать сварные соединения. Свариваемость оценивается степенью соответствия шва одноименным свойствам основного металла, конструкторским и иным требованиям, склонностью к образованию сварочных дефектов (поры, трещины, шлаковые включения и др.). По признаку свариваемости конструкционные материалы можно подразделить:

- на *хорошо свариваемые* (обычно однородные сплавы со структурой шва, идентичной структуре заготовок);

- *удовлетворительно свариваемые* (обычно сплавы с разными физико-химическими свойствами, образующие в соединении твердые растворы или интерметаллидное соединение). Вследствие высокотемпературного нагрева шва и околошовной зоны и их быстрого охлаждения возможно образование закалочных структур, что может привести к закалочным трещинам;
- *плохо свариваемые* — к ним относятся материалы, не вступающие во взаимодействие друг с другом (особенно пары «металл — неметалл»).

Качество сварки оценивается по соответствию шва реальным условиям эксплуатации изделия. Например, у изделий, работающих под нагрузкой, качество сварки оценивается по прочностным показателям шва и околошовной зоны, наличию сварочных дефектов — трещин, пористости, наличию посторонних включений и др.

Рассмотрим основные разновидности сварки, применяемые в машиностроении.

11.1. ДУГОВАЯ СВАРКА

11.1.1. Характеристика дуговой сварки

Источником теплоты при дуговой сварке является электрическая дуга. В зависимости от числа сварочных электродов и их подключения можно различить следующие схемы сварки:

- **сварка прямой дугой** (рис. 11.1, а): в электрическую цепь подключены электрод и свариваемые заготовки; электрическая дуга 3 горит между электродом 2 и свариваемыми заготовками 4. Сварочный шов получается за счет плавления электрода или присадочного прутка 1. Возможно три подключения: сварка переменным током; сварка постоянным током, прямое включение («+» подключен к заготовке); сварка постоянным током, обратное включение («+» подключен к электроду);
- **сварка косвенной дугой** (рис. 11.1, б): электроды 2 включены в цепь переменного тока, дуга 3 горит между электродами;
- **сварка трехфазной дугой** (рис. 11.1, в): дуга 3 горит между электродами 2 и заготовками 4.

Электрическая дуга — мощный, стабильный разряд в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Зажигание дуги при ручной дуговой сварке происходит в три этапа: короткое замыка-

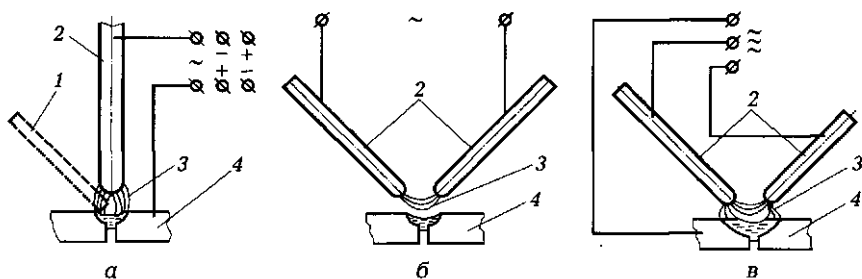


Рис. 11.1. Схемы электродуговой сварки:

а — прямой дугой; б — косвенной дугой; в — трехфазная; 1 — присадочный пруток; 2 — электрод; 3 — дуга; 4 — заготовка

ние электрода на заготовку; отвод электрода от заготовки на расстояние 3...6 мм; возникновение устойчивого дугового разряда. При коротком замыкании разогреваются конец электрода и воздушное пространство вокруг него. После отвода электрода с его разогретого конца начинается эмиссия электронов. Столкновение электронов с молекулами газа приводит к их ионизации, и зажигается дуга. В сварочных автоматах и полуавтоматах дуга зажигается с помощью дополнительного высокочастотного импульса тока.

Электрические свойства дуги описываются статической вольт-амперной характеристикой (рис. 11.2, а), показывающей зону устойчивого горения дуги (заштрихованные участки). Характери-

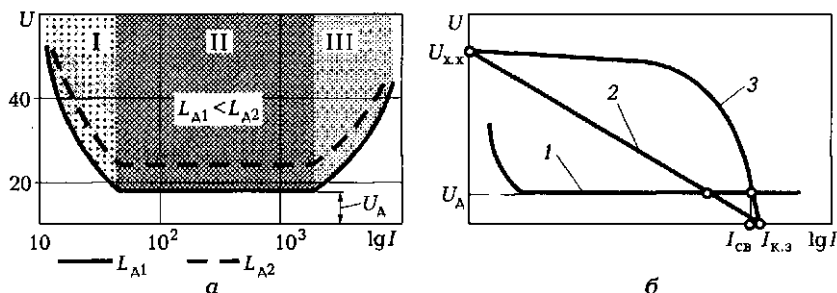


Рис. 11.2. Характеристики дуги и сварочного трансформатора:

а — внутренняя вольт-амперная характеристика дуги; б — внешняя вольт-амперная характеристика трансформатора; I — зона крупнокапельного переноса металла; II — зона мелкокапельного переноса металла; III — зона струйного переноса металла; 1 — характеристика дуги; 2 — полого падающая характеристика трансформатора; 3 — круто падающая характеристика трансформатора; $I_{св}$ — сварочный ток; $I_{к.з}$ — ток короткого замыкания; L_A — длина дуги; U_A — напряжение дуги; U_{xx} — напряжение холостого хода

стика состоит из трех участков: I — участок крупнокапельного течения металла (для сварки не применяется); II — участок мелкокапельного течения металла (применяется для всех видов сварки); III — струйное течение металла (применяется для глубокой проплавки или наплавки металла сварочными автоматами).

В качестве источника сварочного тока используются генераторы и трансформаторы. Сварочный генератор имеет низкий КПД и применяется в условиях отсутствия электролиний. Сварочные трансформаторы имеют высокие надежность и КПД. Рассмотрим его вольт-амперную характеристику (рис. 11.2, б). Любой трансформатор имеет две характерные точки (холостого хода — $U_{х.х}$ и короткого замыкания — $I_{к.з}$). Если нанести на характеристику трансформатора характеристику дуги 1, точка их пересечения даст значения напряжения и тока устойчивого горения дуги. Из графиков видно, что характеристика обычного трансформатора 2 (полого падающая характеристика) не подходит для сварки, так как при изменении длины дуги резко меняется ток сварки. Для сварки используются трансформаторы с круто падающей характеристикой 3.

Экспериментально установлено, что

$$U_A = \alpha + \beta L_A; I_{св} = K D_э,$$

где U_A — напряжение дуги, В; $I_{св}$ — сварочный ток, А; L_A — длина дуги, мм; $D_э$ — диаметр электрода, $D_э = 0,8 \dots 3$ мм; для сварки низкоуглеродистых сталей $\alpha = 10$ В, $\beta = 2$ В/мм, $K = 30 \dots 50$ А/мм.

11.1.2. Ручная дуговая сварка

Ручная дуговая сварка (РДГ) выполняется покрытыми электродами. Схема процесса РДГ показана на рис. 11.3. Дуга 11 горит между стержнем 2 электрода и металлом заготовок 3. Температура дуги $6\,000 \dots 7\,000$ °С. В соответствии с полярностью, на рисунке показано прямое включение, т.е. направление движения электронов 10 совпадает с направлением стекания капель металла 4. Температура катода (электрода) и анода составляет соответственно $2\,400$ и $2\,600$ °С. Вместе со стержнем плавится и покрытие (обмазка) 1 электрода, образуя защитную газовую атмосферу 9 вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну 8 на поверхности жидкого металла 5. Шлаковая ванна и ванна жидкого металла образуют общую сварочную ванну. По мере продвижения дуги сварочная ванна затвердевает, образуя сварочный шов 6 и твердую шлаковую корку 7.

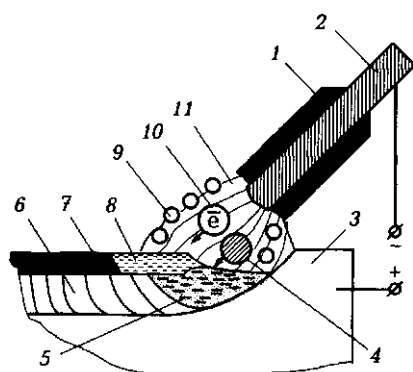


Рис. 11.3. Схема дуговой сварки:

1 — обмазка; 2 — стержень электрода; 3 — заготовка; 4 — капли металла; 5 — ванна жидкого металла; 6 — сварочный шов; 7 — шлаковая корка; 8 — жидкая шлаковая ванна; 9 — защитная газовая атмосфера; 10 — электроны; 11 — дуга

При сравнительно высоком потенциале ионизации железа (7,8 эВ) для стабильного горения дуги необходимо относительно высокое напряжение. Для этого в обмазку электрода добавляют ионизирующие вещества с низким потенциалом ионизации (щелочно-земельные металлы и их соединения). В жидкой сварочной ванне протекают металлургические процессы, поэтому для восстановления оксидов железа в обмазку электрода добавляют раскислители, а для создания защитной, восстановительной атмосферы — газообразующие компоненты (органические вещества — крахмал, древесная мука и др.). Для компенсации выгорания в сварочной ванне легирующих добавок в обмазку и в стержень добавляют соответствующие легирующие компоненты. Жидкий шлак, всплывая на поверхность жидкого металла, защищает его от окисления, твердая шлаковая корка защищает от окисления горячий шов. Для обеспечения этого эффекта в обмазку добавляют шлакообразователи. Дуга при сварке переменным током нестабильна, так как в течение одного периода напряжение дважды становится меньше U_d . Для стабилизации дуги в обмазку электродов для сварки переменным током добавляют ста-

Таблица 11.1. Марки светофильтров для РДГ

Сварочный ток, А	Марка светофильтра
30 ... 70	Э1
75 ... 200	Э2
200 ... 400	Э3
Более 400	Э4, Э5

биллизаторы дуги. Электроды для сварки постоянным током этого компонента не имеют, поэтому они не применимы для сварки переменным током. Торцев этих электродов окрашивается красным цветом. Стержень электрода выполнен из качественной стали (содержание серы и фосфора меньше 0,3 %) и имеет жесткий допуск по диаметру. Сварочную проволоку маркируют так же, как и обычные стали, но после слова «сталь» ставят обозначение Св — сварочная.

Для защиты от воздействия ультрафиолетового излучения сварщик должен быть одет в брезентовую робу, пользоваться брезентовыми рукавицами, маской со светофильтром, прозрачность которого подбирается в зависимости от величины сварочного тока (табл. 11.1).

11.1.3. Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под слоем флюса

Автоматическая и полуавтоматическая сварка под слоем флюса ведется непокрытым электродом (электродной проволокой), дугу и сварочную ванну защищают слоем флюса. Подача сварочной проволоки и перемещение сварочного аппарата (сварочные автоматы) механизированы.

Основные элементы сварочной машины показаны на рис. 11.4, а.

Сварочная проволока 8, намотанная в кассету 7, подается роликовым механизмом 6 в зону сварки. Дуга 2 зажигается между заготовкой 1 и сварочной проволокой. Источник питания 9 обеспечивает постоянное напряжение сварки и высокочастотное импульсное напряжение зажигания дуги. Напряжение на сварочную проволоку передается через контактный мундштук 5. Вся зона сварки закрыта слоем флюса 3, подаваемого из бункера 4.

Схема формирования шва показана на рис. 11.4, б. При горении дуги 2 между заготовкой 1 и сварочной проволокой 8 образуется ванна расплавленного металла 11, закрытая сверху расплавленным шлаком 10 и слоем нерасплавленного флюса 3. Пары и газы, образующиеся в зоне сварки, оттесняют жидкий металл в сторону, противоположную направлению сварки. У основания дуги остается тонкий слой жидкого металла, обеспечивающий глубокий провар основного металла. Закрытая полость, в которой горит дуга, обеспечивает минимальное разбрызгивание и угар металла. Поскольку температура плавления шлака несколько ниже,

11.1.4. Дуговая сварка в атмосфере защитных газов

Недостатки сварки под слоем флюса можно устранить, используя для защиты зоны сварки газ. Обычно применяют аргон, гелий, углекислый газ или смесь этих газов с кислородом. Характеристики поставки аргона и углекислого газа приведены в табл. 11.2.

Принципиальная схема установки для сварки в среде углекислого газа показана на рис. 11.5, а. Омедненная сварочная проволока 5 (плавящийся электрод), намотанная на кассету 4, подается роликовым механизмом 3 в зону сварки. Дуга 9 зажигается между заготовкой 1 и сварочной проволокой. Источник питания 8 обеспечивает постоянное напряжение сварки и высокочастотное импульсное напряжение зажигания дуги. Напряжение на сварочную проволоку передается через контактный мундштук 6. Защитный газ из баллона через редуктор подается в зону сварки по трубку 7.

Установка для аргонодуговой сварки (АДС) имеет аналогичную схему, но может отличаться применением неплавящегося электрода 5 и подачей в зону сварки присадочной проволоки 11 (рис. 11.5, б).

Сварку в среде углекислого газа проводят на постоянном токе прямой полярности. Под действием высокой температуры дуги углекислый газ разлагается: $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$. Поэтому электродная проволока должна содержать элементы-раскислители (сталь Св08ГС, сталь Св10Г2С и др.). Сварку ведут на токах повышенной плотности (80...100 А/мм²). При сварке наблюдается крупнока-

Таблица 11.2. Характеристики поставки аргона и углекислого газа

Защитный газ		Свариваемые материалы	Цвет окраски баллона	Давление газа в баллоне
Обозначение	Сорт (чистота газа)			
Ar	Высший сорт (99,992 %)	Активные и тугоплавкие металлы и сплавы цветных металлов	Серый	15 МПа
	Первый сорт (99,987 %)	Высоколегированные стали		
CO ₂	Сварочный (99,5 %)	Углеродистые и низколегированные стали	Черный	7 МПа (сжиженный)

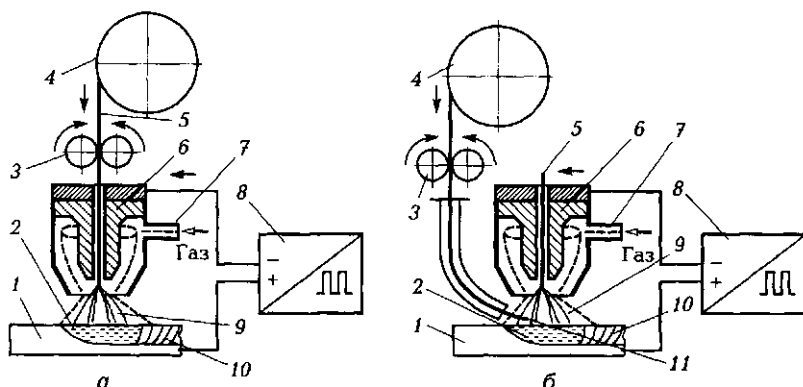


Рис. 11.5. Сварка в среде защитных газов:

а — установка для сварки в среде углекислого газа; *б* — установка для сварки в среде аргона; 1 — заготовка; 2 — сварочная ванна; 3 — роликовый механизм; 4 — катушка; 5 — сварочная проволока (электрод); 6 — контактный мундштук; 7 — патрубок; 8 — источник питания; 9 — дуга; 10 — сварной шов; 11 — присадочная проволока

пельный перенос металла и значительное разбрызгивание. Для уменьшения разбрызгивания применяют смесь углекислого газа (80 %) и кислорода (20 %).

Аргондуговая сварка плавящимся электродом используется для сварки металла толщиной 1...20 мм. Основные параметры: диаметр сварочной проволоки 0,6...3 мм; ток сварки $I_{св} = 12...250$ А; напряжение дуги $U_A = 20...30$ В; скорость сварки 0,2...4 м/мин. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности.

Аргондуговая сварка неплавящимся электродом используется для сварки металла толщиной 0,8...10 мм. Основные параметры: диаметр сварочной проволоки 0,5...6,5 мм; ток сварки $I_{св} = 10...600$ А; напряжение дуги $U_A = 10...30$ В; скорость сварки 0,1...0,8 м/мин. Сварку выполняют на переменном или постоянном токе обратной полярности. Сварку сталей часто производят в смеси газов: аргон и 1 % кислорода.

11.2. ГАЗОВАЯ СВАРКА

Газовая сварка — сварка плавлением, при которой место сварки нагревают высокотемпературным газовым пламенем. Газовое пламя получают при сгорании горючего газа (ацетилен, пропан) в атмосфере технически чистого кислорода.

Кислород поставляется в баллонах голубого цвета с надписью черного цвета «Кислород». При давлении 15 МПа в баллоне помещается 600 л кислорода.

Кислородная аппаратура не должна контактировать с маслом. При контакте масла с кислородом происходит взрыв с образованием воронки глубиной до 5 м!

Ацетилен поставляется в баллонах белого цвета с надписью красного цвета «Ацетилен». Ацетилен взрывоопасен! Поэтому баллон заполнен активированным углем и ацетоном. Растворенный в ацетоне ацетилен, пропитавший пористую массу активированного угля, безопасен. Ацетилен можно получать в ацетиленовых генераторах (при реакции карбида с водой), однако этот способ чрезвычайно взрывоопасен.

Для понижения давления газа применяют газовые редукторы (рис. 11.6). Запорный клапан 3 редуктора находится под давлением запорной пружины 1 и давлением гибкой мембраны 7.

При нормальном рабочем давлении редуцированного газа в камере низкого давления 4 устанавливается равновесие, запорный клапан прижимается к седлу 8 запорной пружины и преграждает доступ газа из камеры высокого давления 2 (из баллона). Гибкая мембрана регулировочной пружиной 6 через нажимной диск 5 и толкач 9 воздействует на запорный клапан и стремится открыть его. Изменяя натяжение регулировочной пружины, можно менять рабочее давление.

Для сварки чаще всего используются наиболее безопасные газосварочные горелки инжекторного типа (рис. 11.7). Кислород под давлением 0,1 ... 0,4 МПа через кислородный вентиль 4 поступает в инжектор 6. Выходя с большой скоростью из узкого канала инжектора, кислород подсасывает горючий газ, поступающий через вентиль 5. В смесительной

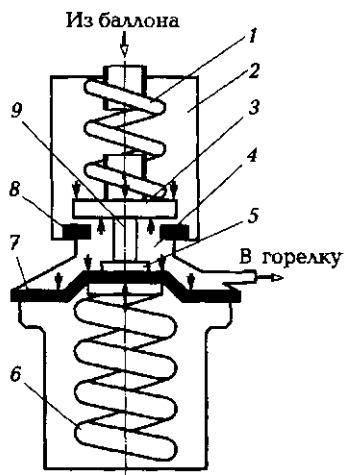


Рис. 11.6. Газовый редуктор:

1 — пружина; 2 — камера высокого давления; 3 — запорный клапан; 4 — камера низкого давления; 5 — нажимной диск; 6 — регулировочная пружина; 7 — гибкая мембрана; 8 — седло клапана; 9 — толкач



Рис. 11.7. Газосварочная инжекторная горелка:

1 — наконечник; 2 — мундштук; 3 — смесительная камера; 4 — кислородный вентиль; 5 — ацетиленовый вентиль; 6 — инжектор

камере 3 получается горючая смесь, которая через мундштук 2 подается к сменному наконечнику 1.

Во избежание взрыва первым открывают кислородный вентиль, а по окончании сварки первым отключают горючий газ.

В сварочном производстве горелки подразделяются на семь номеров (табл. 11.3).

Внешний вид и температура газового пламени зависят от соотношения объемов ацетилена и кислорода $\beta = V(\text{O}_2)/V(\text{C}_2\text{H}_2)$. При $\beta = 1 \dots 1,3$ — нормальное пламя, при $\beta = 1,5 \dots 1,7$ — окислительное пламя, при $\beta = 0,95$ — науглероживающее пламя. Газовое пламя неоднородно по строению (рис. 11.8): зона 1 — ядро пламени; зона 2 — восстановительное пламя; зона 3 — факел.

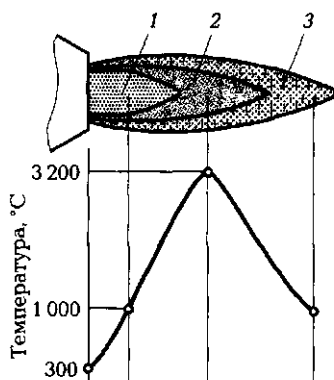
Газокислородная резка металлов заключается в сжигании нагретого металла в струе чистого кислорода. Для осуществления процесса резки необходимы следующие условия:

Таблица 11.3. Рекомендации по применению газовых горелок

Параметр	Номер наконечника						
	1	2	3	4	5	6	7
Толщина свариваемого металла (сталь), мм	0,5... 1	1... 3	3... 4	5... 7	8... 10	12... 16	18... 30
Диаметр отверстий, мм:							
■ инжектора	0,25	0,35	0,45	0,6	0,75	0,95	1,2
■ смесительной камеры	0,85	1,25	1,6	2	2,5	3	3,8
■ мундштука	0,8	1,15	1,5	1,9	2,3	2,8	3,5

Рис. 11.8. Строение газового пламени:

1 — ядро; 2 — восстановительное пламя; 3 — факел



- теплопроводность металла не должна быть слишком высокой (для концентрации теплоты на кромке реза);
- количество теплоты, выделяемой при резке, должно поддерживать непрерывность процесса;
- температура плавления шлаков должна быть ниже температуры горения металла в кислороде;
- температура плавления металла должна быть выше температуры его горения в кислороде.

Наиболее полно этим условиям удовлетворяют низкоуглеродистые и низколегированные стали. При концентрации углерода 0,4...0,5 % резка усложнена, более 1,2 % резка невозможна; при содержании в стали марганца 4...10 % резка усложняется, более 14 % резка невозможна.

Газовый резак отличается от газовой горелки наличием дополнительного кислородного вентиля. Процесс резки осуществляется в два этапа: первый — нагрев зоны резки до температуры горения металла в кислороде (характеризуется появлением большого числа искр), второй — собственно резка (отключается ацетилен и кислород из основной магистрали; дополнительным вентилем подключается кислород).

11.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Контактная сварка — сварка давлением с кратковременным нагревом места соединения проходящим электрическим током (рис. 11.9). Наибольший нагрев наблюдается в стыке заготовок ($R_1 + R_{эл} \ll R_k, R_3, R_{эл}, R_k$ — омические сопротивления заготовок, электрической цепи станка и стыка соответственно). В результате высокой плотности тока в зоне контакта металл разогревается до термопластического состояния или до оплавления. При непрерыв-

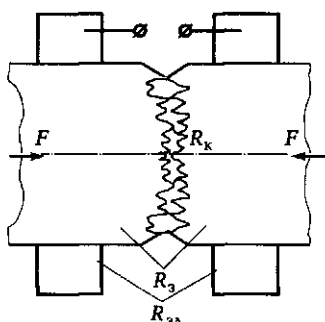


Рис. 11.9. Схема контактной сварки:

F — сила прижима (проковки); R_z — омическое сопротивление заготовок; R_k — омическое сопротивление стыка; $R_{эл}$ — омическое сопротивление электрической цепи станка

ном сдавливании заготовок происходит сближение поверхностей до расстояний, меньших межатомных, — происходит сварка.

Различают сварку стыковую, точечную, шовную и рельефную.

11.3.1. Стыковая сварка

При стыковой сварке заготовки соединяются по всей поверхности соприкосновения. Сварочная машина показана на рис. 11.10. На станине 6 установлены две плиты: неподвижная 7 и подвижная 3, перемещаемая по направляющим 4. Заготовки 2 устанавливаются в прижимах 1. Сварочный ток подается от трансформатора 5.

Различают сварку сопротивлением (нагрев торцов заготовок до термопластического состояния) и сварку оплавлением (нагрев торцов до оплавления).

Процесс **сварки сопротивлением** идет в три этапа: предварительный прижим заготовок, разогрев торцов, проковка (прижим заготовок и выдержка). Этим способом сваривают заготовки сечением до 100 мм². Сечения заготовок должны быть одинаковы по

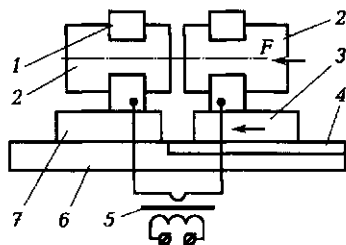
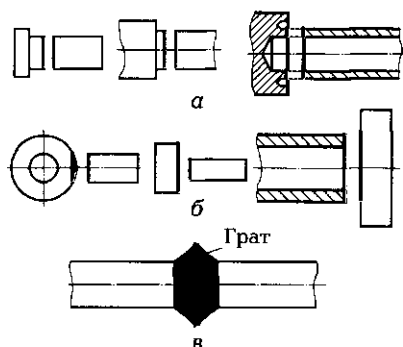


Рис. 11.10. Машина для стыковой сварки:

1 — прижим; 2 — заготовки; 3 — подвижная плита; 4 — направляющая; 5 — сварочный трансформатор; 6 — станина; 7 — неподвижная плита; F — сила проковки

Рис. 11.11. Требования к заготовке при стыковой сварке:

а — при сварке сопротивлением; *б* — при сварке оплавлением; *в* — появление грата



форме (рис. 11.11, *а*), очищены от оксидов и иметь минимальный периметр. Этим методом сваривают низкоуглеродистые и низколегированные стали, алюминиевые и медные сплавы.

Сварка оплавлением ведется при непрерывном оплавлении торцов заготовок. Для этого между заготовками оставляют небольшой зазор, подключают напряжение и равномерно их сближают. Расплавленный и кипящий металл выбрасывается наружу. После достижения равномерного оплавления по всей поверхности стыка проводят проковку. При прерывистом оплавлении несколько раз сближают и рассоединяют заготовки, прежде чем достигается быстрое оплавление поверхностей стыка, затем проводят проковку.

Сварка оплавлением не требует тщательной подготовки торцов заготовок (рис. 11.11, *б*), однако расплавленный металл, застывая, образует грат (рис. 11.11, *в*), который необходимо удалять механическим способом. Сварка оплавлением позволяет сваривать заготовки с различными сечениями из разнородных металлов.

11.3.2. Точечная сварка

Точечная сварка позволяет соединять листовые и иные заготовки внахлест. Перед началом сварки контактные поверхности зачищают и обезжиривают. Заготовки *1* устанавливают между нижним и верхним электродами сварочной машины (рис. 11.12, *а*). Затем заготовки сжимают и подают ток. Прогрев осуществляют до появления жидкой точки *2* между контактными поверхностями, после чего производят проковку. Для соединения заготовок одновременно в двух точках применяют одностороннюю сварку. Заго-

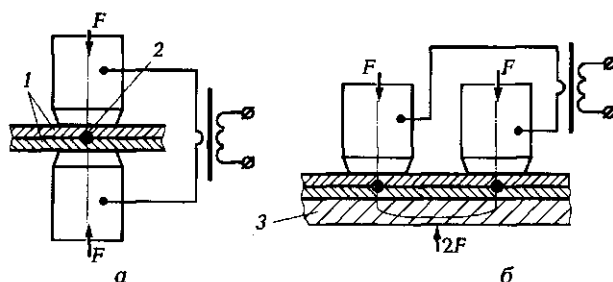


Рис. 11.12. Точечная сварка:

а — схема сварки; *б* — схема односторонней сварки; 1 — заготовки; 2 — сварочная точка; 3 — плита; F — сила прижима (проковки)

Таблица 11.4. Режимы точечной сварки

Режим	Плотность тока, А/мм ²	Усилие на электродах, кН	Продолжительность протекания тока, с
Мягкий	80 ... 160	0,06 ... 1,5	0,5 ... 3
Жесткий	120 ... 360	0,09 ... 3,0	0,001 ... 0,01

товки устанавливают на медную плиту 3 (рис. 11.12, б) и прижимают электродами, расположенными с одной стороны заготовок. Процесс сварки идет в три этапа: предварительный прижим заготовок, разогрев торцов, проковка (прижим заготовок и выдержка). Различают сварку на мягких и жестких режимах (табл. 11.4). Мягкие режимы применяются в бытовых сварочных машинах. В промышленности применяют жесткие режимы, это позволяет сваривать коррозионно-стойкие стали, алюминиевые и медные сплавы.

Точечная сварка не позволяет получить непрерывный шов. Минимальное расстояние между сварными точками должно быть более 10 суммарных толщин свариваемых листов. В противном случае произойдет шунтирование, т.е. ток пойдет через ранее полученную сварочную точку.

11.3.3. Роликовая (шовная) сварка

Роликовая сварка предназначена для соединения листовых материалов непрерывным швом. Для этого заготовки размещают между вращающимися роликами-электродами (рис. 11.13, а). Шов-

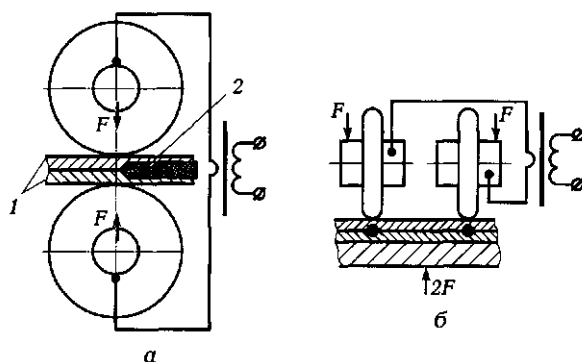


Рис. 11.13. Роликовая (шовная) сварка:

а — схема сварки: 1 — заготовка; 2 — сварочный шов; *б* — схема односторонней сварки; F — сила прижима (проковки)

ную сварку, так же, как и точечную, можно выполнять при одностороннем расположении электродов (рис. 11.13, б).

Различают непрерывную (с постоянной подачей сварочного тока) и импульсную (с импульсной подачей сварочного тока) роликовую сварку.

При непрерывной сварке происходит перегрев металла шва и околошовной зоны, что отрицательно сказывается на качестве шва и работоспособности роликов.

При импульсной подаче тока перегрева металла не происходит. Необходимо, чтобы сварочные точки перекрывали друг друга на $\frac{1}{3}$ или на $\frac{1}{4}$ их диаметра. Из-за большого влияния шунтирования нецелесообразно сваривать листы суммарной толщиной более 3 мм.

11.4. ПАЙКА

Пайка — способ образования неподвижных соединений за счет смачивания твердых поверхностей более легкоплавким расплавленным металлом (припоем). При смачивании устанавливаются межатомные связи между соединяемыми деталями и припоем. С помощью пайки ведут сборку различных типов соединений: внахлест, в стык, тавровые, телескопические.

Паяное соединение состоит из трех зон: припой и две диффузионные зоны «припой — соединяемый металл». Для обеспечения смачивания припоем паяных поверхностей необходимо удаление жировых и оксидных пленок. Удаление пленок ведут механиче-

ским (стальными щетками, абразивной или ультразвуковой обработкой) или химическим (травление) путем.

Элементами паяного соединения являются:

- зазор между соединяемыми поверхностями;
- галтель — валик припоя вокруг паяного соединения, образуемый после пайки;
- паяный шов.

Технологический процесс пайки включает в себя:

- подготовку поверхностей;
- сборку деталей;
- укладку припоя (возможно, с нанесением флюса);
- пайку (местный или общий нагрев);
- обработку соединения после пайки (удаление лишнего припоя, флюса).

Припой — чистый металл или сплав, вводимый в зазор между паяными поверхностями. Для низкотемпературной пайки обычно применяют припой на основе сплава олово — свинец. Припой специального назначения имеют добавки: Ga, In, Bi, Cd, Sb, Pb, Ag, Au. Характеристика и назначение некоторых припоев приведена в табл. 11.5.

Флюсы — химические вещества, используемые для разрушения оксидных пленок; улучшения смачиваемости паяных поверхностей и для их защиты от окисления. Флюсы должны иметь высокую жидкотекучесть, стабильность химического состава и активность в широком интервале температур расплавленного припоя, минимальное химическое взаимодействие с паяными металлами. Флюсы и продукты их взаимодействия должны легко удаляться промывкой или испарением после пайки.

Для низкотемпературной пайки медных или покрытых серебром проводников применяют канифоль и стеарино-парафиновые (нейтральные) флюсы. Для пайки стали, меди, никеля используют пасты на основе вазелина (10... 15 % $ZnCl_2$ или NH_4Cl); для высоколегированных сталей и нержавеющей сталей применяют 25... 30%-ный раствор $ZnCl_2$ в воде (кислотный флюс — хорошо растворяет оксидные пленки, но требует тщательной промывки места пая в воде).

По механизму образования соединения различают:

- *пайка готовым припоем* — обычная капиллярная пайка, при которой расплавленный припой под действием капиллярных сил затекает в зазор;
- *пайка контактно-реактивная* — основана на получении жидкого припоя в результате плавления двух разнородных метал-

Таблица 11.5. Припои

Вид	Марка	Компоненты, %	Температура плавления, °C	Область применения
Низкотемпературная пайка				
Оловянно-свинцовые	ПОС40	Sn-40 Pb-60	220	Радиаторы автомобилей
Оловянно-свинцовые сурьмянистые	ПОСС ₃₀₋₂	Sn-30 Pb-68 Sb-2	250	Электроарматура
Висмутовые	Сплав Вуда	Bi-50, Pb-25 Sn-12,5, Cd-12,5	74	Медь и ее сплавы
Галлиевые	Г15	Ga-60, Cu-30 In-10	—	Паста для пайки Al и его сплавов
Цинковые	ПКЦ	Zn-60, Cd-40	300	Al и его сплавы
Высокотемпературная пайка				
Медные	M0 — M4	Cu около 100	1083	Сталь, металлокерамика
Медно-цинковые	Л68	Cu-68 Zn-32	940	Сталь
Жаропрочные	ВПр1	Cu-67,5 Ni-29 Si-1,8 Fe-1,5 B-0,2	1120	Жаропрочные стали

лов, образующих сплав. Эта пайка может происходить самопроизвольно между паяными металлами и покрытиями, нанесенными на них;

- *реактивно-флюсовая пайка* — предполагает образование припоя при химической реакции между паяными металлами и флюсом;
- *металлокерамическая пайка* — выполняется с помощью порошковых припоев, способных заполнять большие зазоры. Порошковый припой состоит из тугоплавкого наполнителя, близкого по составу к паяемому металлу и легкоплавкой основы, обеспечивающей хорошее смачивание;
- *диффузионная пайка* — основана на диффузионном взаимодействии паяемого металла и припоя при кристаллизации шва. Нагрев припаяваемых деталей производят:
- при низкотемпературной пайке — паяльником, паяльной лампой, газовыми горелками, горячим газом или в печах;
- при высокотемпературной пайке — в индукционных, газопламенных или иных печах, лазерным или электронным лучом.

11.5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАЗРУШЕННЫХ И ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

11.5.1. Восстановление деталей наплавкой

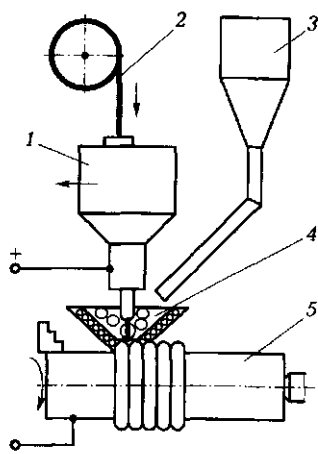
Одним из тепловых способов воздействия на материал детали является наплавка металла на ее изношенные поверхности. В практике ремонта используются следующие способы: дуговая наплавка под флюсом, наплавка в среде углекислого газа, электродуговая наплавка вольфрамовым электродом в среде аргона, вибродуговая наплавка, широкослойная наплавка, плазменно-дуговая и лазерная наплавка.

Дуговая наплавка под флюсом. Дуговая наплавка под флюсом широко применяется для восстановления цилиндрических и плоских поверхностей деталей. При этом механизированном способе наплавки совмещены два основных движения электрода: перемещение вдоль сварочного шва и его подача по мере оплавления детали.

Сущность процесса наплавки показана на рис. 11.14. Деталь 5, установленная на токарном станке, контактирует через наплавочную головку 1 с электродной проволокой 2. Флюс 4 подается автоматически из бункера 3. Сварочный ток от преобразователя и вы-

Рис. 11.14. Схема автоматической дуговой наплавки цилиндрических деталей под флюсом:

1 — наплавочная головка; 2 — электродная проволока; 3 — бункер; 4 — флюс; 5 — деталь



прямителя обеспечивает горение дуги. Под действием высокой температуры образуется газовый пузырь, в котором существует дуга, расплавляющая металл. Часть флюса плавится, образуя вокруг дуги эластичную оболочку из жидкого флюса, защищающая металл от окисления, уменьшающая разбрызгивание и угар. После кристаллизации металла на детали образуется сварочный шов.

Наплавка под флюсом обеспечивает:

- легирование металла через проволоку и флюс с получением покрытия, равномерного по химическому составу и свойствам;
- защиту сварочной дуги и ванны жидкого металла от окисления воздухом;
- выделение растворенных газов и шлаковых включений из сварочной ванны в результате медленной кристаллизации жидкого металла под флюсом;
- возможность повышения производительности труда в 6—8 раз за счет увеличения скорости сварки (из-за повышенных сварочных токов).

Кроме того, это наименее энергоемкий и наиболее экономичный (по расходу электродного материала) способ наплавки, позволяющий получить слой наплавленного металла большой толщины (1,5...5,0 мм и более).

К недостаткам способа следует отнести: значительный нагрев детали; невозможность наплавки изделий диаметром менее 40 мм из-за стекания наплавленного металла и трудности удержания флюса на поверхности детали; определенная трудность удаления шлаковой корки и возможность возникновения трещин и образования пор в наплавленном металле.

Режимы наплавки зависят от таких параметров, как сила тока, напряжение, скорость наплавки, материал электродной проволоки, ее диаметр и скорость подачи, марка флюса, шаг наплавки. Сила сварочного тока определяется по формуле

$$I = 110d_3 + 10d_3^2,$$

где d_3 — диаметр электродной проволоки, мм.

Наплавку обычно ведут постоянным током обратной полярности с напряжением сварочной дуги в пределах 25...35 В, скоростью подачи проволоки 75...180 м/мин при скорости наплавки 20...25 м/ч. Вылет электрода и шаг наплавки зависят от диаметра проволоки:

$$\delta = (10...12)d_3; \quad S = (2,0...2,5)d_3,$$

где δ — вылет электрода, мм; S — шаг наплавки, мм.

Процесс наплавки плоских поверхностей осуществляется путем перемещения наплавочной головки вдоль детали со смещением электродной проволоки на 3...5 мм поперек движения после наложения шва заданной длины. Основные параметры наплавки плоских поверхностей приведены в табл. 11.6.

Характеристики наплавленного слоя (твердость и износостойкость) в основном зависят от марки применяемой электродной проволоки и флюса. В случае наплавки деталей с большим износом обычно применяют автоматическую наплавку порошковой проволокой, в состав которой входят феррохром, ферротитан, ферромарганец, графитовый и железные порошки. При этом используют два типа порошковой проволоки: для наплавки под флюсом и для открытой дуги без дополнительной защиты. Режим наплавки в этом случае зависит от марки проволоки и диаметра детали. Для уменьшения разбрызгивания электродного материала во время наплавки используют постоянный ток низкого напряжения (20...21В).

В условиях сервиса при ремонтном восстановлении деталей автомобилей наплавку под флюсом применяют для восстановления

Таблица 11.6. Основные параметры наплавки плоских поверхностей

Износ, мм	Сила тока, А	Проволока	
		скорость подачи, м/ч	диаметр, мм
2...3	160...220	100...125	1,6...2,0
2...4	320...350	150...200	1,6...2,0
4...5	350...340	180...210	2,0...3,0
5...6	650...750	200...250	4,0...5,0

шек коленчатых валов, шлицевых поверхностей на различных валах и других деталей.

Наплавка в среде углекислого газа. Наплавка в среде углекислого газа в части применяемого оборудования для закрепления детали и подачи электродной проволоки принципиально мало чем отличается от наплавки под флюсом (в качестве защитной среды здесь используется CO_2). Ток к электродной проволоке подводится через мундштук и наконечник, расположенные внутри газозлектрической горелки.

При наплавке металлы электрода и заготовки перемешиваются. В зону горения дуги под давлением 0,05...0,2 МПа подается углекислый газ, который, вытесняя воздух, защищает расплавленный металл от вредного воздействия кислорода и азота воздуха. При движении сопла горелки вдоль заготовки за сварочной ванной образуется слой наплавленного металла. Особенностью процесса наплавки в среде CO_2 является то, что углекислый газ при выходе из баллона резко расширяется и переохлаждается. Для подогрева его пропускают через электрический подогреватель. Содержащуюся в углекислом газе воду удаляют с помощью осушителя, представляющего собой патрон, наполненный обезвоженным медным купоросом или силикагелем. Давление газа понижается с помощью кислородного редуктора, а расход его контролируется расходомером.

При наплавке в среде углекислого газа наблюдается меньший нагрев деталей и имеется возможность обработки деталей диаметром менее 40 мм. Отсутствует трудоемкая операция по отделению шлаковой корки, а наплавка может производиться при любом пространственном положении детали. Производительность процесса по площади покрытия на 20...30 % больше.

Недостатками процесса является: повышенное разбрызгивание металла и необходимость применения легированной проволоки для получения наплавленного металла с требуемыми свойствами.

Наплавку в среде углекислого газа производят на постоянном токе обратной полярности. Тип и марку электродной проволоки выбирают в зависимости от материала ремонтируемой детали и требуемых физико-механических свойств наплавленного металла. В зависимости от силы сварочного тока выбирается скорость подачи проволоки, устанавливаемая с таким расчетом, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий и обрывов дуги. Скорость наплавки определяется в основном толщиной наплавляемого металла и качеством формирования наплавленного слоя. Наплавку валиков осуществляют с шагом 2,5...3,5 мм при условии,

что последующий валик перекроет предыдущий не менее чем на $\frac{1}{3}$ его ширины.

Марка и тип электродной проволоки определяют твердость наплавленного металла (200...300 НВ). Ее диаметр влияет на расход углекислого газа. На этот же параметр влияет скорость наплавки, конфигурация изделия и наличие движения воздуха.

Электродуговая наплавка вольфрамовым электродом. В среде аргона электродуговая наплавка вольфрамовым электродом широко используется для восстановления деталей из алюминиевых сплавов и титана. Источником тепловой энергии в этом случае служит электрическая дуга, которая горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и деталью. Защитным газом служит аргон, а присадочным материалом — проволока. Аргон надежно защищает расплавленный металл от окисления воздухом. В результате наплавленный металл получается плотным, без пор и раковин. Добавление к аргону углекислого газа 10...12 % и кислорода 2...3 % способствует повышению устойчивости горения дуги и улучшению формирования наплавленного металла. Наружная защита струи аргона углекислым газом позволяет сократить расход аргона в 3—4 раза.

По сравнению с газовой сваркой электродуговая наплавка неплавящимся электродом обеспечивает: повышение производительности процесса в 3—4 раза, высокую механическую прочность сварного шва, небольшую зону термического влияния; снижение потерь энергии дуги на световое излучение (аргон задерживает ультрафиолетовые лучи).

Недостатками процесса являются использование дорогостоящего аргона и высокая стоимость процесса (в 3 раза выше, чем при газовой сварке).

Режим наплавки зависит от силы тока и диаметра электрода. Последний обычно составляет 4...10 мм, а сила сварочного тока — в пределах 100...500 А. Устойчивость процесса наплавки и хорошее формирование наплавленного металла позволяет вести обработку на скоростях до 150 м/ч.

Вибродуговая наплавка. Вибродуговая наплавка, как разновидность дуговой наплавки металлическим электродом, осуществляется при вибрации электрода с подачей охлаждающей жидкости на наплавленную поверхность.

Принципиальная схема вибродуговой установки с электромеханическим вибратором показана на рис. 11.15.

Обработка детали 3 осуществляется в центрах токарного станка, на суппорте которого установлена наплавочная головка с меха-

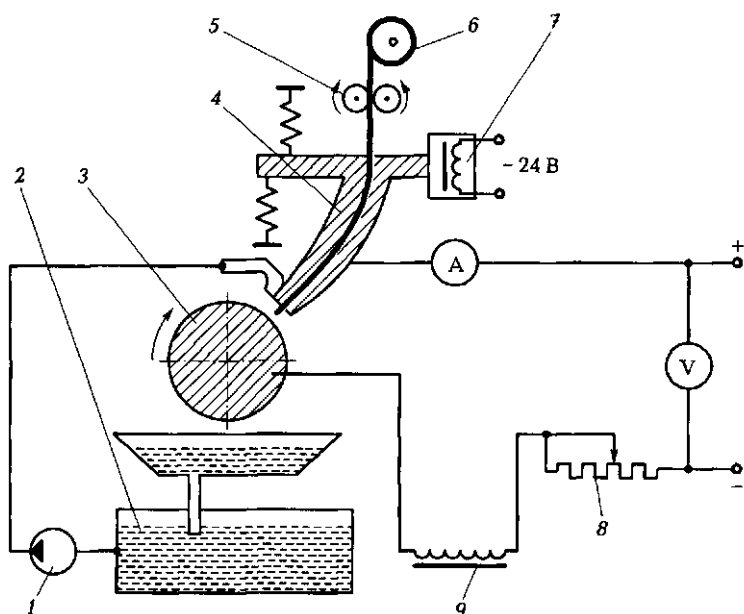


Рис. 11.15. Схема установки для вибродуговой наплавки:

1 — насос; 2 — бак; 3 — деталь; 4 — мундштук; 5 — механизм подачи; 6 — кассета; 7 — вибратор; 8 — реостат; 9 — дроссель

низом 5 подачи проволоки из кассеты 6, электромагнитным вибратором 7 и мундштуком 4. Колебания конца электрода с частотой 110 Гц и амплитудой колебания до 4 мм (обычно 1,8...3,2 мм) создаются вибратором 7. Перенос металла с электрода на деталь происходит при периодическом замыкании электродной проволоки и детали. Стабильность процесса обеспечивается вибрацией электрода во время наплавки, что объясняется частыми возбуждениями дуговых разрядов. Вибрация также способствует подаче электродной проволоки небольшими порциями, что обеспечивает лучшее формирование наплавленных валиков без пор и трещин. Питание установки осуществляется от источника тока напряжением 24 В, последовательно с которым включен дроссель 9 низкой частоты, стабилизирующий силу сварочного тока. Регулирование силы тока в цепи выполняется реостатом 8. Охлаждающая жидкость (4...6%-ный раствор кальцинированной соды в воде) в зону наплавки подается насосом 1 из бака 2.

Вибродуговая наплавка обеспечивает: небольшой нагрев восстанавливаемой детали за счет ограниченной зоны термического

влияния; высокую производительность процесса; минимальную деформацию детали, не превышающую долей допусков посадочных мест.

Существенным недостатком данного способа наплавки является снижение усталостной прочности детали после наплавки на 30...40 %.

На качество соединения наплавленного металла с основным влияет большое число различных факторов. К ним относятся: полярность тока (желательна обратная полярность), шаг наплавки (2,3...2,8 мм/об), угол подвода электрода к детали (15...30°), качество очистки и подготовки поверхности под наплавку, толщины слоя наплавки и др. Скорость подачи электродной проволоки не должна превышать 1,65 м/мин, а скорость наплавки — 0,5...0,65 м/мин. Наибольшая скорость наплавки:

$$v = (0,4...0,7)v_{\text{пр}}; \quad v_{\text{пр}} = \frac{nSDh}{250d^2r},$$

где $v_{\text{пр}}$ — скорость подачи электродной проволоки, м/мин; n — частота вращения детали, мин^{-1} ; S — шаг наплавки, мм/об; D — диаметр детали, мм; h — толщина наплавляемого слоя, мм; d — диаметр электродной проволоки, мм; r — коэффициент наплавки ($r = 0,85...0,9$).

Рекомендуемая толщина наплавляемого слоя равна 0,5...3,0 мм. Структура и твердость последнего зависят от химического состава электродной проволоки и количество охлаждающей жидкости. В случае использования проволоки Нп-80 валик в охлаждающей жидкости закаливается до высокой твердости (порядка 26...55 HRC). Низкоуглеродистая проволока Св08 дает твердость поверхности наплавки в пределах 14...19 HRC.

Рациональный режим наплавки: напряжение — 28...30 В, сила тока — 70...75 А, диаметр проволоки — 1,6 мм, скорость подачи проволоки — 1,3 м/мин, скорость наплавки — 0,5...0,6 м/мин, амплитуда вибраций — 1,82 мм.

Широкоослойная наплавка. Это наплавка тел вращения за один оборот детали с поперечным колебанием электрода, а не по винтовой линии.

Процесс наплавки осуществляется отдельными участками в целях исключения коробления детали.

Плазменно-дуговая наплавка. Плазменно-дуговая наплавка выполняется одиночным валиком (при наплавке цилиндрических деталей по винтовой линии), а также с применением колебательных механизмов на прямой и обратной полярности. К наиболее

простому способу такой наплавки следует отнести наплавку по заранее насыпанному на наплавляемую поверхность порошку.

В ремонтной практике для получения износостойких покрытий применяют хромборникелевые порошки, твердосплавные порошки на железной основе, а также смеси порошков.

Лазерная наплавка. Лазерная наплавка представляет собой способ получения покрытий с заданными физико-механическими свойствами путем нанесения порошка, фольги или проволоки (наплавочный материал) на восстанавливаемую поверхность с последующим оплавлением этого материала лазерным лучом.

Способы подачи порошка на поверхность детали могут быть самые разнообразные: с помощью дозатора (непосредственно в зону лазерного луча); предварительной обмазкой поверхности клеящим составом с последующей обсыпкой порошком; в виде коллоидного раствора (смесь порошка и раствора целлюлозы). В первом случае имеет место увеличенный расход порошка (в 5—7 раз) и ухудше-

Таблица 11.7. Технологические параметры лазерной наплавки в зависимости от фракции и состава порошка

Порошок	Фракции, мкм	Скорость наплавки, см/мин	Микротвердость, МПа
ПН73ХС3РЗ	200 ... 300	38	7,5
		28	6,5
		21	5,5
		13	4,5
	100 ... 200	38	6,5
		28	6,0
		21	5,5
		13	3,5
	60 ... 100	38	3,2
		28	2,9
		21	2,5
		13	2,4
ПГФБХ-6-2	100 ... 200	15 ... 38	8,0 ... 10,0
	200 ... 400	15 ... 35	8,5 ... 11,0
	400 ... 600	15 ... 30	9,0 ... 11,5

ние физико-механических свойств покрытия, хотя энергоемкость процесса наплавки наименьшая.

КПД наплавки увеличивается с ростом толщины обмазки (увеличивается поглощение излучения). Одновременно растет твердость нанесенного слоя, которую можно регулировать в пределах 34...65 HRC путем подбора скорости наплавки и грануляции порошка материала. Увеличение размеров частиц порошка приводит к росту твердости и износостойкости покрытия. Рациональной является смесь различных фракций: 40...100 мкм — 10 %; 100...280 мкм — 80 %; 280 мкм и более — 10 %.

На качество покрытия влияют скорость перемещения лазерного луча, толщина наплавляемого слоя и перекрытие валиков. Характеристики покрытия, нанесенного лазерной наплавкой, следующие:

- толщина слоя (наплавка за один проход) — до 0,8 мм;
- толщина дефектного слоя — не более 0,1 мм;
- прочность сцепления — до 0,35 кН/мм;
- потери наплавляемого материала — не более 1 %;
- глубина зоны термического влияния — не более 1 мм.

Толщина нанесенного слоя может достигать 40...50 мкм. Лазерной наплавкой восстанавливают тарелки клапанов, кулачки распределительных и кулачковых валов и других деталей.

Технологические параметры лазерной наплавки приведены в табл. 11.7.

11.5.2. Восстановление цилиндрических деталей методом контактной приварки металлической ленты

Для восстановления поверхностей валов, а также отверстий в чугунных и стальных деталях, в том числе и корпусных, может быть использован прогрессивный процесс электроконтактной приварки ленты (провода), сущность которого состоит в точечной приварке ленты к поверхности детали в результате воздействия мощного импульса тока. В точке сварки происходит расплавление металла ленты и детали. Схема процесса показана на рис. 11.16.

Деталь 2 устанавливают в центре 1 или патроне, а сварочная головка с роликами 4 перемещается на тележке. Лента (провод) 3 плотно прижимается роликами 4 посредством пневматических цилиндров. Провод тока к роликам производится от транс-

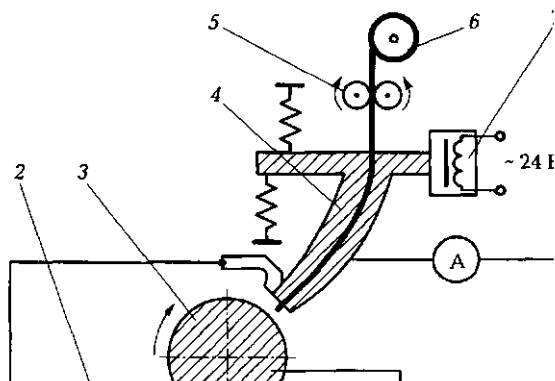


Рис. 11.16. Схема электроконтактной приварки стальной ленты:

1 — центр; 2 — восстанавливаемая деталь; 3 — лента (проволока); 4 — ролик; 5 — трансформатор; 6 — прерыватель тока

форматора 5. Требуемая длительность цикла обеспечивается прерывателем тока 6.

Изношенную поверхность восстанавливают приваркой стальной ленты ко всей поверхности или по винтовой линии в процессе вращения детали. Скорость вращения детали пропорциональна частоте импульсов и продольному перемещению сварочной головки.

Особенностью конструкции установки является бесступенчатое регулирование частоты вращения и скорости подачи, обеспечиваемое тиристорными электроприводами постоянного тока.

Достоинства способа: высокая производительность процесса (в 2—3 раза превосходит вибродуговую наплавку); малое тепловое воздействие на деталь (не более 0,3 мм); небольшая глубина плавления; низкий расход присадочных материалов и значительное уменьшение припуска на механическую обработку; возможность получения наплавленного металла с любыми свойствами; благоприятные санитарно-производственные условия работы сварщика.

Диаметр восстанавливаемых деталей — 20...200 мм, толщина привариваемой ленты 0,15...1,5 мм.

Износостойкость, твердость и прочность сцепления ленты с деталью зависят от марки стали ленты. Высокую твердость обеспечивают ленты из хромистых и марганцевых сталей. Рекомендации по выбору материала представлены в табл. 11.8.

Усилие прижатия роликов при приварке ленты 1,3...1,6 кН.

Таблица 11.8. Зависимость твердости приваренного слоя от материала ленты

Марка стали привариваемой ленты	Твердость приваренного слоя HRC	Марка стали привариваемой ленты	Твердость приваренного слоя HRC
Сталь 20	30...35	Сталь 55	50...55
Сталь 40	40...45	Сталь 40X	55...60
Сталь 45	45...50	Сталь 65X	60...65

Электроды (ролики) изготавливают из бронзы (БрНБТ — 0,5-0,3, БрХ, БрХЦр — 0,6-0,05) или меди М-1.

В качестве оборудования для реализации процесса электроконтактной приварки ленты (проволоки) применяют специальные установки «Ремдеталь»: 011-1-02 и ОКС-12296-ГОСНИТИ — для шеек валов; 011-1-05 — для резьбовых участков валов малого диаметра и поверхностей деталей типа «вал»; 011-1-06 — для внутренних поверхностей гильз цилиндров; 011-1-11 — коренных опор блоков цилиндров.

Оrientировочные режимы приварки стальной ленты приведены в табл. 11.9.

В целом режимы процесса регламентируются электрическими и механическими показателями. К электрическим показателям относятся: сила сварочного тока и длительность сварочного цикла. Малая сила тока не обеспечивает надежной приварки, а большая сила тока приводит к образованию на поверхности детали пор и трещин. Механическими показателями являются частота вращения, подача электродов, усилие сжатия электродов. Подачу электродов, частоту вращения детали, продолжительность сварочного цикла подбирают из условия получения шести-семи сварочных точек на 1 см длины шва.

Подбор осуществляется с помощью эталонных образцов при постоянной скорости вращения. Подача электрода должна обеспечить оптимальное перекрытие сварочных точек: малое перекрытие ухудшает свариваемость ленты с основным металлом, а повышенное — увеличивает зону отпуска, что снижает твердость приваренного слоя. Недостаточное усилие сжатия электродов на поверхности ленты и детали приводит к эрозионному разрушению, сопровождающемуся сильным искрением в зоне контакта; большое усилие сжатия электродов приводит к деформации электродов и снижению их стойкости. Роль охлаждающей жидкости сво-

Таблица 11.9. Ориентировочные режимы приварки стальной ленты

Параметр	Детали	
	корпусные	типа «вал»
Сила сварочного тока, А	7,8...8,0	16,1...18,1
Длительность сварочного цикла, с	0,12...0,16	0,04...0,08
Длительность паузы, с	0,08...0,10	0,10...0,12
Скорость сварки, м/мин	0,5	0,7...1,2
Подача электродов, мм/об	Ручная	3...4
Усилия сжатия электродов, кН	1,70...2,25	1,90...1,60
Ширина рабочей части электродов, мм	8	4
Диаметр рабочей части электродов, мм	50	150...180
Материал ленты	Сталь 20	Сталь
Материал детали	Чугун СЧ 18-36; СЧ 21-40	Сталь любая
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	0,5...1,0	1,5...2,0

дится к охлаждению роликов сварочной головки и эффективному отбору теплоты из зоны приварки.

Твердость восстанавливаемой поверхности достигает 55 HRC и более.

В качестве примера, для деталей типа «вал» диаметром 30...50 мм рекомендуются следующие режимы приварки ленты толщиной 0,44 мм: частота вращения — 5 мин⁻¹; подача сварочной головки — 3 мм/мин; усилие сжатия электродов — 1,5 кН; количество охлаждающей жидкости — 1,5 л/мин.

11.5.3. Использование микроплазменной сварки и наплавки металла в автосервисной практике

Для соединения листового металла небольшой толщины и наплавки покрытий на детали типа тел вращения используются портативные и стационарные аппараты и установки для микроплаз-

менной обработки металлов, которая является разновидностью плазменной сварки, применяемой для изделий из различных металлов и их сплавов толщиной 0,05... 2,0 мм.

Плазмотрон для микроплазменной обработки (сварки, наплавки и др.) аналогичен плазмотрону для плазменной резки металлов, но имеет меньшие размеры. Для обработки неметаллических деталей (различных пластмасс, диэлектрических материалов) применяют плазмотрон, в котором сжатая дуга возбуждается и горит внутри сопла — анода. Под действием струи плазмообразующего газа возникает тепловой факел, длина которого зависит от режима работы плазмотрона и состава плазмообразующего газа.

В комплект оборудования для микроплазменной обработки металлов входят: источник питания, аппаратура контроля и регулирования расхода плазмообразующего и защитного газов, баллоны с газами, плазмотрон и система водяного охлаждения.

Отечественная промышленность выпускает плазмотроны, отличающиеся по конструкции типом токоподвода, размером охлаждающего канала, конструкцией выводов. Плазмотрон для микроплазменной сварки металлов модели Об-1-160А отличается от плазмотрона для резки размерами и составом плазмообразующего (рабочего) газа. Техническая характеристика плазмотрона приведена в табл. 11.10, где также даются технические параметры портативных аппаратов «Алмаз-02М» и «Мультиплаз-2500».

Плазмотроны предназначены для резки, сварки, пайки черных и цветных металлов (сталь, алюминий, медь, магний и их сплавы). Технология проведения сварочных работ с использованием портативных аппаратов «Алплаз» и «Мультиплаз» сходна с технологией использования обычных газовых сварочных аппаратов. При плазменной сварке или пайке применяются те же присадки, флюсы и припой, что и при обычной газовой сварке. Приборы обеспечивают качественное сварное соединение, как при сварке с присадочной проволокой, так и без нее (например, при сварке «внахлест»). Плазмотрон «Мультиплаз» обеспечивает возможность проведения как «газовой» так и «электродуговой» сварки. При сварке алюминия рекомендуется использовать флюс А-34.

Российская промышленность выпускает установки для ручной (УПНС-304) и механизированной (УПВ-301) плазменной наплавки покрытий на детали типа тел вращения при их восстановительном ремонте. Ручная плазменная наплавка выполняется на постоянном токе в непрерывном и импульсном режиме работы установки и обеспечивает получение покрытий с нужными свойствами при

Таблица 11.10. Технические характеристики плазмотронов для микроплазменной обработки металлов

Параметр	«Алплаз-02М»	«Мультиплаз-2500»	О6-1160А
Напряжение питающей сети, В	(220±10)%	(220+10)%	(220+10)%
Номинальный рабочий ток, А	—	—	33
Потребляемая мощность, Вт	1 300	2 500	—
Габаритные размеры блока питания, мм	210×200×70	325×170×115	108×130×50
Масса плазмотрона, кг	0,7	0,7	0,5
Масса блока питания, кг	4,0	5,5	—
Температура пламени	8 000	8 000	10 000
Расход рабочей жидкости (вода или смесь «вода — спирт»), л/ч	0,2	0,25	—
Расход газа, л/мин: защитного плазмообразующего	— —	— —	3...9 0,15...0,2

минимальной толщине наплавки. Ручная аргонодуговая сварка на установке УПНС-304 производится на токах 4...80 А.

Установка УПВ-301 обеспечивает скоростную механизированную плазменную наплавку в непрерывном и импульсном режимах с обеспечением малых деформаций обрабатываемых деталей и малых припусков на последующую механическую обработку.

В качестве плазмообразующего и защитного газа в установках используется аргон. Охлаждение плазмотрона водяное. Номинальный ток (ПВ) 315 А (60 %) 250 А (100 %), напряжение питания — 3×380 В. Технические характеристики установок приведены в табл. 11.21.

Таблица 11.11. Технические характеристики установок плазменной наплавки для восстановительного ремонта деталей

Характеристика	УПНС-304	УПВ-301
Тип	Ручная	Механизированная
Потребляемая мощность, кВт	25	25

Характеристика	УПНС-304	УПВ-301
Назначение	Сварка — наплавка	Наплавка
Регулировка рабочего тока, А	Плавная 20 ... 160	Главная 20 ... 315
Толщина наносимого слоя за один проход (наплавка), мм	1 ... 4	0,2 ... 2,0
Производительность наплавки	3 кг/ч	100 см /мин
Материал электрода	Вольфрам	Вольфрам
Длина шланга, м	4,5	4,5
Максимальный расход газа, л/ч	1 250	1 250
Расход охлаждающей воды, л/ч	200	200

В ремонтной практике для получения износостойких покрытий применяют наиболее простой способ наплавки — наплавка по заранее насыпанному на наплавляемую поверхность порошку. Обычно используют хромборникелевые порошки СНГН и ПГ-ХН80СР4, твердосплавные порошки на железной основе ФБХ-2, КБХ, УС-25 и другие, а также смеси порошков.

Режимы плазменной наплавки порошковыми материалами приведены в табл. 11.12.

Таблица 11.12. Режимы плазменной наплавки порошковыми материалами

Номер режима	Наплавляемый порошок	Режим наплавки				Формирование наплавляемого слоя, мм		Твердость НРС
		Число слоев	Сварочная сила тока, А	Скорость подачи порошка, м/ч	Расход порошка, кг/ч	Высота (максимальная)	Глубина	
1	ПГ-СР4	Один	120	6	3,2	2,7 ... 3,0	4,0 ... 4,2	50 ... 52
2			145	6	3,2	2,9 ... 3,3	4,3 ... 4,7	41 ... 42
4			145	11	3,2	1,7 ... 1,9	0,5 ... 2,3	44 ... 49

Номер режима	Наплавляемый порошок	Режим наплавки				Формирование наплавляемого слоя, мм		Твердость HRC
		Число слоев	Сварочная сила тока, А	Скорость подачи порошка, м/ч	Расход порошка, кг/ч	Высота (максимальная)	Глубина	
5			120	11	3,2	2,4...2,5	0,5...0,6	56...58
6			100	11	3,2	2,4...2,9	—	58...61
7			100	6	3,2	4,2...4,6	0,5	56...57
8			120	6	3,2	7,0...7,2	1,6...3,2	48...52
9	ПГ-СР4	Первый	100	6	3,2	7,1...7,2	0,4...0,5	57...60
		Второй	100	6	3,2	—	—	—
10		Первый	145	11	3,2	5,0...5,7	0,5...2,1	48...50
		Второй	100	6	3,2	—	—	—
11	ПГ-СР2 ПГ-СР4	Первый	100	6	2,7	5,3...6,0	0,5...1,0	57...59
		Второй	100	6	3,2	—	—	—
12	ПГ-СР2 ПГ-СР4	Первый	120	11	2,4	5,5...5,5	0,5...1,5	55...56
		Второй	100	6	3,2	—	—	—
13	ПГ-С ПГ-СР4	Первый	100	6	2,7	6,0...6,0	1,0...1,3	48...51
		Второй	100	6	3,2	—	—	—

11.5.4. Лазерная наплавка для ремонтного восстановления деталей

В ремонтной практике лазерная наплавка используется для восстановления тарелок клапанов, кулачков распределительных и кулачковых валов и других деталей.

Лазерная наплавка представляет собой технологический метод получения покрытий с заданными физико-математическими свойствами путем нанесения наплавочного материала (порошок, фольга, проволока) с последующим оплавлением его лазерным лучом. Наименьшие затраты энергии имеют место при использовании порошковых материалов.

Порошки на поверхность детали могут подаваться непосредственно в зону лазерного луча с помощью дозатора или после предварительной обмазки имеющимся составом; в виде коллоидного раствора. Для первого случая характерен увеличенный расход порошка (в 5—7 раз) и ухудшение физико-математических свойств покрытия. Коллоидный раствор представляет собой смесь порошка и раствора целлюлозы.

КПД наплавки растет с увеличением толщины обмазки, так как в этом случае увеличивается и поглощение излучения. Одновременно возрастает твердость нанесенного слоя, которую путем подбора скорости наплавки и материалов можно регулировать в пределах 35... 65 HRC.

При наплавке порошковых материалов следует учитывать грануляцию частиц, так как увеличение размеров частиц приводит к росту твердости и износостойкости покрытия. Наиболее рациональной является смесь различных фракций: 40... 100 мкм — 10 %, 100... 280 мкм — 80 %, 280 мкм и более — 10 %. Технологические параметры наплавки порошком приведены в табл. 11.13.

В зависимости от скорости перемещения лазерного луча, толщины наплавленного слоя и перекрытия валиков в значительной степени меняется и качество покрытия. Обычно оно имеет следующие характеристики:

- толщина слоя, наплавленного за один проход — до 0,8 мм;
- толщина дефектного слоя — не более 0,1 мм;
- прочность сцепления — до 0,35 кН/мм²;
- потери наплавленного материала — не более 1 %;
- глубина зоны термического слоя до 40... 50 мм.

Таблица 11.13. Технологические параметры лазерной наплавки в зависимости от фракции и состава порошка

Порошок	Фракции, мкм	Скорость наплавки, м/мин	Микротвердость, МПа	Прочность сцепления с основой, МПа
ПН73ХСЗРЗ	200... 300	38	7,5	250
		28	6,5	

Порошок	Фракции, мкм	Скорость наплавки, м/мин	Микротвердость, МПа	Прочность сцепления с основой, МПа
		21	5,5	250
		13	4,5	
	100...200	38	6,5	
		28	6,0	
		21	5,5	
		13	3,5	
	60...100	38	3,2	
		28	2,9	
		21	2,5	
		13	2,4	
ПГФБХ-6-2	100...200	15...38	8,0... 10,0	350
	200...400	15...35	8,5... 11,0	
	400...600	15...30	9,0... 11,5	

Технологический процесс наплавки проводится на установках, которые используют серийные лазеры: АГН-702 «Кардамон»; АП-2 «Иглай», «Комета», «Катунь», Латус-31, Юпитер 1.0 и лазерные технологические модули: 01.03.178 «Ремдеталь» и 01.12.376 «Ремдеталь».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем различие между сваркой давлением и сваркой плавлением?
2. Что такое сварка прямой дугой обратной полярности?
3. Какова роль обмазки сварочного электрода?
4. Какие средства индивидуальной защиты используются сварщиком при ручной дуговой сварке?
5. Что такое сварка под слоем флюса?
6. Какие газы применяются для сварки в среде защитных газов?
7. Расскажите о безопасном способе хранения ацетилена в баллонах.

8. В какие цвета окрашиваются баллоны для хранения различных газов?
9. Как устроена инжекторная газосварочная горелка?
10. Какие мероприятия по охране труда нужно обязательно проводить при газовой сварке?
11. Что такое стыковая сварка сопротивлением?
12. Какие заготовки сваривают точечной сваркой?
13. Почему точечная сварка не позволяет получить герметичный шов?
14. Чем пайка отличается от сварки?
15. Перечислите элементы паяного соединения.
16. Зачем при пайке применяют флюсы?
17. Назовите основные способы наплавки деталей.
18. Когда применяется наплавка под флюсом и что она обеспечивает?
19. От чего зависят характеристики наплавленного слоя?

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Понятие ресурсосбережения непосредственно вытекает из определения технологического процесса получения изделия и метода обработки, а также параметров, их характеризующих. Применительно к машиностроению, **технологическим процессом** называется определенная последовательность действий для получения конструкционных материалов, заготовок, деталей, агрегатов и машин в целом. Кроме того, технологический процесс делится на отдельные операции, содержание которых полностью определяется методами обработки, которые, в свою очередь, определяются способами формирования параметров качества изделия с производительностью, соответствующей наименьшим затратам в заданных условиях производства.

На основании этого можно сделать важный вывод о том, что основными параметрами, характеризующими эффективность технологического процесса, операции и метода обработки являются технологичность конструкции изделия в целом и отдельных деталей этого изделия, производительность процессов и себестоимость изготовления изделий.

12.1. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ

Изготовление изделия (детали), соответствующего требованиям его (ее) эксплуатации при низкой себестоимости изготовления, возможно только при обеспечении принципа технологичности конструкции. Технологичная конструкция обеспечивает высокие эксплуатационные показатели, минимальные трудозатраты, материалоемкость и себестоимость. Одновременно технологичность конструкции способствует быстрому освоению серийного выпуска изделия.

В соответствии с ГОСТ 14.205—83* различают:

- производственную технологичность — технологичность конструкции изделия при технологической подготовке производства, изготовлении, а также монтаже вне предприятия-изготовителя;
- эксплуатационную технологичность — технологичность конструкции изделия при подготовке его к использованию по назначению, техническом обслуживании, текущем ремонте и утилизации;
- ремонтную технологичность — технологичность конструкции изделия при всех видах ремонта, кроме текущего.

Обработка конструкции изделия (детали) на технологичность (ОКТ) — непрерывный процесс, начинающийся с первых этапов проектирования изделия и продолжающийся в период подготовки производства и серийного выпуска изделия. Обработку конструкции на технологичность ведут как конструкторы, так и технологи. При этом невозможна качественная ОКТ только инженером-конструктором, не понимающим сущности процессов переработки материалов в изделие (от заготовительных до финишных переделов), так и только инженером-технологом, не понимающим условий эксплуатации изделия.

Глубина ОКТ зависит от объема производства. Для опытного или единичного производства требуется менее глубокая проработка, чем для серийного, а тем более для крупносерийного или массового производства.

Конструктивная ОКТ включает в себя:

- упрощение компоновки изделия;
- расчленение конструкции на отдельные части для удобства монтажа и регулировки;
- обеспечение возможности параллельной сборки отдельных элементов (сборочных единиц) изделия;
- сокращение номенклатуры деталей, входящих в изделие;
- применение деталей простой геометрической формы;
- унификация применяемых материалов и размеров;
- выбор конструкторских баз и простановку размеров с учетом процесса изготовления детали;
- установление рациональных показателей точности (размерной, геометрической и др.).

Технологическая ОКТ включает в себя:

- соблюдение конструктивной преемственности и унификации деталей, сборочных единиц, агрегатов, обеспечивающее сокращение сроков освоения производства;

- применение современных, высокопроизводительных, гибких автоматизированных и наиболее рациональных технологических процессов обработки и сборки;
- обеспечение заданного качества изделия;
- обеспечение минимального расхода материалов на изготовление изделия;
- применение рациональных и современных методов контроля качества.

Одним из важных элементов технологической ОКТ является отработка конструкции детали по критерию «технологические требования метода или способа изготовления к конструкции детали».

Оценка технологичности конструкции. Оценивать технологичность конструкции возможно по нескольким критериям. Самым универсальным критерием является *стоимость изготовления изделия (себестоимость)*. Ее можно выразить упрощенной формулой себестоимости:

$$C = M + Z + H,$$

где C — себестоимость; M — стоимость материалов; Z — основная заработная плата; H — накладные расходы.

Общая трудоемкость изделия складывается из трудоемкости изготовления заготовки, механической и термической обработки и т.д. Стоимость материалов зависит от материалоемкости — расхода материалов, требуемого для изготовления изделия. Рациональность расходования материалов оценивается коэффициентом использования материала, характеризующим отношение массы изделия к массе материалов, затраченных на его изготовление.

При углубленной ОКТ технологичность изделия оценивается по дополнительным показателям: «унификация деталей», «применение специальных конструкционных материалов», «применение дефицитных материалов» и др.

Общие требования по технологичности конструкции, исходя из условий обработки резанием. В серийном производстве технологичной может считаться та деталь, конструкция которой допускает снятие минимального припуска на обработку. Это значит, что форма детали должна обеспечить выбор заготовки (и рационального метода получения заготовки), форма и размеры которой приближаются к форме и размерам готовой детали. Форма детали должна быть простой, не требующей изготовления специального инструмента сложной конструкции или применения специальных процессов для обработки.

Минимальная по трудоемкости и станкоемкости и высококачественная обработка детали должна обеспечиваться благодаря хорошей обрабатываемости материала. Например, детали из низкоуглеродистых сталей плохо шлифуются, при их обработке трудно получить высокую чистоту поверхности. Обработка среднеуглеродистых и низколегированных сталей дает более высокую чистоту поверхности. Обработка высоколегированных сталей малопроизводительна вследствие низких скоростей резания. При твердости материала детали более 45 HRC лезвийная обработка затруднительна, приходится применять низкопроизводительную абразивную обработку.

Технологичность детали можно повысить за счет сокращения числа обрабатываемых поверхностей: объединения поверхностей; получения на стадии заготовки неотчетливых поверхностей такого качества, что их можно оставлять без обработки.

К форме поверхностей детали предъявляют следующие основные требования:

- простота геометрической формы поверхностей (плоскость, цилиндр, сфера), подвергаемых обработке резанием;
- унификация поверхностей;
- удобное для обработки резанием расположение поверхностей (взаимно параллельное или взаимно-перпендикулярное);
- наибольшая согласованность формы и размеров обрабатываемых поверхностей с режущим и мерительным инструментом, изготавливаемым по государственным стандартам или по ведомственным нормам;
- расположение элементов детали с учетом особенности обработки их на станках;
- обеспечение обработки поверхностей высокопроизводительными методами и инструментами;
- отсутствие поверхностей, возможность получения которых обеспечивается только слесарной обработкой;
- доступность обработки и измерения параметров поверхностей;
- обеспечение выхода режущего инструмента при обработке на проход;
- обеспечение жесткости детали;
- обеспечение надежных технологических баз;
- обеспечение принципов постоянства баз и совпадения конструкторских, технологических и измерительных баз;
- равномерное распределение массы во избежание возникновения вибраций на высоких частотах вращения.

12.2. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И СЕБЕСТОИМОСТЬ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЯ

Производительность обработки изделия. Производительность обработки Q (число деталей выпускаемых в единицу времени) рассчитывается по формуле

$$Q = 1/T_{\text{шт}},$$

где $T_{\text{шт}}$ — штучное время.

Штучное время $T_{\text{шт}}$ складывается из основного технологического T_o , подготовительно-заключительного $T_{п-з}$ времени и времени на организационное и техническое обслуживание рабочего места $T_{\text{орг.тех}}$. Основное технологическое время, т.е. время, затрачиваемое непосредственно на обработку поверхности (детали), равно сумме машинного времени T_m , вспомогательного времени T_s и времени холостых ходов $T_{х.х}$:

$$T_o = T_m + T_s + T_{х.х}.$$

Машинное время T_m , мин, — это время, затрачиваемое на снятие стружки:

$$T_m = L/(nS_o),$$

где L — длина обработки, мм, n — частота вращения, мин^{-1} ; S_o — подача на оборот, мм.

Вспомогательное время T_s затрачивается на следующие перемещения режущего инструмента с рабочей подачей: подвод, врезание, прохождение участков, не требующих снятия стружки, перебеги (гарантированный отвод инструмента). Время холостых ходов $T_{х.х}$ затрачивается на быстрый подвод-отвод режущего инструмента в зону обработки.

При обработке единичных деталей параметры режимов резания определяют в такой последовательности:

- выбирают значение глубины резания, при этом стремятся весь припуск на обработку снять за один проход. Если это невозможно или затруднительно, то применяют два прохода: за первый проход снимается 80 % припуска, за второй — 20 %;
- определяют величину скорости движения подачи. Обычно выбирают наибольшую допустимую скорость движения подачи исходя из точности обработки и допустимой шероховатости обработанной поверхности, учитывая при этом мощность станка, режущие свойства инструментального материала, вид обработ-

ки, свойства материала заготовки, жесткость и виброустойчивость станка;

- рассчитывают скорость резания, учитывая мощность станка, режущие свойства инструментального материала, вид обработки, свойства материала заготовки, жесткость и виброустойчивость станка;
- рассчитывают частоту вращения шпинделя станка (или вращающегося инструмента);
- рассчитывают стойкость инструмента;
- рассчитывают машинное время.

При обработке партии деталей на многоинструментальных системах (многоинструментальные или многопозиционные станки, автоматические линии) методика выбора режимов резания несколько иная:

- выбирают значение глубины резания, при этом стремятся весь припуск на обработку снять за один проход. Если это невозможно или затруднительно, то применяют два прохода: за первый проход снимается 80 % припуска, за второй — 20 %;
- определяют величину скорости движения подачи для каждого инструмента. Обычно выбирают наибольшую допустимую скорость движения подачи исходя из точности обработки и допустимой шероховатости обработанной поверхности, учитывая при этом мощность станка, режущие свойства инструментального материала, вид обработки, свойства материала заготовки, жесткость и виброустойчивость станка. Назначают единую подачу для каждого суппорта;
- назначают единую стойкость для всех режущих инструментов, участвующих в работе, с учетом видов инструментов, числа инструментов. Чем больше инструментов и чем большее их разнообразие, тем меньше назначаемая стойкость;
- выбирают скорость резания для каждого инструмента, с учетом стойкости инструментов, мощности станка, режущих свойств инструментального материала, вида обработки, свойств материала заготовки, жесткости и виброустойчивости станка. Назначают единую скорость резания, равную минимальной скорости резания из всех инструментов в наладке;
- рассчитывают частоту вращения шпинделя и уточняют ее по паспорту станка;
- по уточненной частоте вращения шпинделя уточняют фактическую скорость резания для каждого инструмента;
- рассчитывают суммарную мощность резания и мощность станка;

- уточняют модель станка и рассчитывают машинное, основное технологическое, штучное время и производительность обработки.

Себестоимость обработки изделия. Общая структура себестоимости C , руб., изготовления изделия имеет вид

$$C = П + EK,$$

где $П$ — переменные затраты, руб; K — капитальные затраты, руб; E — нормативный коэффициент износа оборудования, зависящий от срока службы оборудования: при сроке службы 7 лет $E = 0,15$, при сроке службы 5 лет $E = 0,2$.

Переменные затраты $П$ включают в себя затраты на материалы M ; заработную плату основных рабочих $З_{о.р}$; накладные расходы N ; затраты на обслуживание рабочего места $З_{о.в}$, в том числе и затраты на обслуживание основных рабочих (затраты на организацию питания, отдыха и естественные надобности в пересчете на одного рабочего); затраты на охрану труда рабочих $З_{о.т}$ в пересчете на одного рабочего; затраты на восстановление ущерба экологической среды $З_э$ в пересчете на одного рабочего; затраты на режущий инструмент и технологическую оснастку $З_{ин}$; затраты на восстановление работоспособности режущего инструмента $З_в$:

$$П = M + З_{о.р} + N + З_{о.в} + З_{о.т} + З_э + З_{ин} + З_в.$$

Капитальные затраты включают в себя стоимость основного и вспомогательного оборудования $K_о$; стоимость производственной площади $K_{п.}$, занятой под производство изделия:

$$K = K_о + K_{п.}$$

12.3. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Из общей структуры себестоимости следует, что основными направлениями ресурсосбережения являются уменьшение капитальных вложений в новое производство, снижение материалоемкости изделий и энергоемкости процессов обработки, а также минимизация фонда заработной платы и эксплуатационных расходов на амортизацию оборудования, оснастки и инструмента. Каждое из этих направлений характеризуется одним или несколькими параметрами эффективности.

В частности, материалоемкость изделия оценивается коэффициентом использования материала (КИМ), который равен отношению массы всего изделия m_n к массе материалов $\sum m_{ij}$, затраченных на изготовление деталей, его составляющих:

$$\text{КИМ} = m_n / \sum m_{ij}$$

где $i = 1 \dots n$ — номенклатура деталей, входящих в изделие; $j = 1 \dots m$ — номенклатура конструкционных материалов, составляющих i -ю деталь.

Коэффициент использования материала при конкретном методе обработки представляет собой отношение массы детали к массе заготовки.

Снижение материалоемкости изделия, которое можно охарактеризовать стремлением этих коэффициентов к единице, является одной из основных задач ресурсосберегающей технологии. Эту задачу приходится решать комплексно, так как вся технология производства машин делится на несколько технологических переделов: металлургию (производство металлов и сплавов), производство заготовок (литье, обработка металлов давлением, методы порошковой металлургии), термическую обработку с тепловым и термохимическим воздействием, механическую обработку (методы резания и поверхностного пластического деформирования), а также сборочное производство.

Многоэтапность технологии объясняется тем, что на каждом технологическом переделе формируются те или иные параметры качества изделия.

В металлургическом производстве обеспечиваются химический состав сплавов, структура и физико-механические свойства основного объема металла. Заготовительные методы позволяют придать заготовке первоначальную форму с определенной долей приближения к требуемой, которая окончательно формируется методами резания и поверхностного пластического деформирования. Методы термической и термохимической обработки позволяют изменять структуру, фазовый состав и физико-механические свойства как основного объема металла детали, так и поверхностного слоя ее отдельных поверхностей. Сборка готового изделия осуществляется из отдельных деталей механическими методами или сваркой с получением подвижных и неподвижных соединений.

Указанные технологические переделы характеризуются рядом взаимосвязанных параметров. Например, общее количество металла, превращаемого при резании заготовки в стружку, в значи-

тельной степени зависит от величины припуска на механическую обработку. Припуск на механическую обработку, в свою очередь, определяется методом получения заготовки. Например, при применении круглого проката для изготовления ступенчатого вала коэффициент использования материала невысок. В этом случае необходимо применить метод получения заготовки, обеспечивающий минимальную величину припуска и максимальный коэффициент использования материала. Таким методом является поперечно-клиноватая прокатка, применение которой обеспечивает получение ступенчатой заготовки с формой, в наибольшей степени соответствующей форме обработанной детали. Это позволяет получить заготовку с минимальными припусками и сократить объем обработки металлов резанием. Однако продольная и поперечно-клиноватая прокатка имеют различную стоимость заготовки и требуют различных капитальных вложений за счет особенностей применяемого инструмента и оборудования соответствующей мощности и стоимости. Кроме того, данные методы получения заготовки обеспечивают разную производительность процессов.

Применение различного по мощности оборудования обуславливает соответствующий расход энергии для осуществления процессов деформации и формообразования заготовок. Увеличение энергоемкости процессов формообразования влечет за собой изменение затрат на эксплуатацию и периодический ремонт данного оборудования. При большей энергоемкости процессов увеличиваются и затраты на используемый при обработке инструмент, так как при увеличении значений возникающих сил снижается стойкость инструмента и повышается его расход. Пропорционально увеличиваются затраты на обрабатывающий инструмент и технологическую оснастку, что обуславливает большую себестоимость и цену изделий, отрицательно влияя на их конкурентоспособность.

Энергоемкость достаточно часто применяют в качестве основного критерия при выборе наиболее выгодного в техническом и экономическом плане метода обработки, особенно для процессов с большими затратами энергии (обработка металлов давлением, некоторые виды сварки, черновые операции обработки резанием и др.). Например, для процессов обработки металлов давлением в качестве параметров энергоемкости применяют работу деформации и необходимые усилия. Кроме того, для процессов деформации целесообразно использовать такой критерий, как мощность, который учитывает не только силовые параметры, но и скорость

воздействия. Роль данного критерия становится решающей при сравнении методов обработки, происходящих с большими скоростями.

12.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ ВИДОВ ОБРАБОТКИ

Все виды обработки можно разделить на три энергетических уровня. К первому энергетическому уровню относятся методы обработки, при осуществлении которых нарушаются связи между небольшой частью молекул и атомов удаляемого слоя металла. Типовым представителем методов данного энергетического уровня является обработка металлов резанием. Например, для удаления стружки с поверхности заготовки из стали необходимы затраты энергии, не превышающие величины энергии для ее плавления — $1 \cdot 10^4$ Дж/см³.

Второй энергетический уровень составляют методы с затратами энергии от энергии плавления до энергии испарения обрабатываемого металла — $(1 \dots 6) \cdot 10^4$ Дж/см³. Это методы обработки, при осуществлении которых ослабляются связи между всеми молекулами и атомами заготовки. К их числу относятся все методы литейного производства.

К третьему энергетическому уровню относятся методы обработки с расходом необходимой энергии выше энергии испарения обрабатываемого материала (более $6 \cdot 10^4$ Дж/см³). При этом полностью разрушаются связи между всеми молекулами и атомами материала заготовки. Такие явления происходят при реализации лазерной, электронно-лучевой, электроимпульсной, электроэрозионной и электрохимической обработки.

Сравнительная оценка способов обработки по энергоемкости не является полной, так как расход энергии все же не является основной составляющей себестоимости. Кроме того, энергетические показатели (кроме мощности) не учитывают скорость осуществления воздействия и не оценивают производительность рассматриваемого процесса.

Наиболее полными показателями эффективности методов обработки и технологических процессов и операций являются производительность и себестоимость обработки заготовок и деталей заданного качества. Поэтому сравнительный анализ может производиться на основе отношений основного времени, необходимого

на обработку, а также стоимостей ее осуществления различными методами.

Для оценки эффективности обработки заготовок резанием вместо отношений основных времен можно использовать отношения произведений скорости резания на среднюю толщину среза, так как данные параметры характеризуют разрешающую способность единицы длины режущей кромки в анализируемых процессах и совместно с суммарной шириной среза полностью определяют величину основного времени. При этом отношение основных времен осуществления обработки различными методами выражается в виде непрерывной функции параметров обрабатываемой детали и параметров инструмента. Выявлено также, что отношения штучных времен и величин себестоимости реализации сравниваемых методов качественно повторяют ту же закономерность.

Для конкретизации искомых закономерностей необходимо знать скорости резания и среднюю толщину среза при использовании каждого из рассматриваемых методов, которые могут быть определены на основе соответствующих нормативов. Указанные параметры среза могут служить также для определения расчетной величины отклонений детали от заданной формы, так как они определяются кинематикой формообразования и являются следствием погрешностей заготовки, станка, инструмента и других параметров процесса резания.

12.5. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Профессором А. О. Этиным разработана методика определения рациональной области применения методов обработки, основанная на анализе кинематики резания и построении сравнительных графиков производительности и технологической себестоимости в виде непрерывных функций зависимости от параметров обрабатываемой поверхности.

Комплексным методом обоснованного выбора технологического процесса является его оптимизация с применением математического моделирования. Задача технологической оптимизации заключается в нахождении из множества возможных технологических процессов, обеспечивающих заданные чертежом параметры качества, процесса, обеспечивающего экстремальное значение одного из выбранных технологических критериев. Как указы-

валось, критерием эффективности являются себестоимость или производительность технологического процесса. При этом следует помнить, что в основе разработки технологического процесса любого передела лежат два основных принципа: технический и экономический. Из этого следует, что технологический процесс должен полностью обеспечивать требования, заданные рабочим чертежом и техническими условиями на изготовление изделия, заготовки или детали, и в соответствии с экономическим принципом должен иметь минимальные затраты труда и минимальные издержки производства. Соответственно, из возможных вариантов технологического процесса, одинаковых с точки зрения технического принципа, выбирают наиболее эффективный по производительности или рентабельности. При равной производительности разработанных технологических процессов выбирают наиболее рентабельный, из двух, равных по рентабельности, — наиболее производительный. Однако если годовая программа выпуска изделия (а соответственно, и производительность) задана техническими условиями на проектирование, то производительность рассматривается как один из параметров системы технологических ограничений. В этом случае рентабельность, или себестоимость, техпроцесса является основным критерием его эффективности.

Оптимизация технологического процесса является сложной многокритериальной и многовариантной задачей, решение которой осуществляют с помощью математических моделей методами исследования операций. Процедура решения технологических задач в этом случае состоит из следующих этапов:

- постановка задачи;
- построение математической модели;
- нахождение решения;
- проверка модели и оценка решения;
- реализация решения и контроль его правильности.

Постановка задачи, во-первых, требует определения возможных стратегий и управляемых переменных, во-вторых, определения условий среды и неуправляемых переменных, а также определения структуры технологических целей, их значимости и выделения из множества целей критерия предпочтительного выбора. Так как технологический процесс характеризуется большим числом факторов, имеющих сложные взаимосвязи, необходимо выбрать наиболее существенные и значимые для конкретных условий обработки факторы. Правильная постановка задачи определяет, насколько полученное в результате моделирования решение будет адекватно действительным процессам.

Модели являются формализованными описаниями отображаемых ими явлений, с помощью которых можно определить, как влияют изменения в рассматриваемой системе на качество ее функционирования. Чаще всего модели имеют более простой вид, чем отображаемые ими системы, так как для описания их поведения обычно достаточно небольшого числа переменных. Главный вопрос заключается в правильном выборе нужных значимых переменных и нахождении основных соотношений между ними.

Различают несколько типов моделей. К *изобразительным моделям* относятся объемные макеты объектов в натуральном и уменьшенном виде, а также фотографии, чертежи и эскизы. Данные модели трудно использовать в экспериментальных целях. К *аналоговым моделям* относятся карты, графики и т.д., с которыми легче оперировать, чем с изобразительными. Элементы изобразительной и аналоговой моделей используются при разработке блок-схем алгоритмов. Наиболее удобными в экспериментальном плане являются *символические модели*, которые имеют вид математических выражений, причем ограничения управляемых и управляемых переменных выражаются в системе уравнений или неравенств.

В целях исследования поведения различных технологических систем можно разрабатывать модели с различной степенью соответствия этих моделей реальным процессам, используя непосредственный анализ функционирования системы, применение аналога, анализ данных и другие методы. При этом часто менее точная модель, разработанная со значительными допущениями, является более ценной для практических целей исследования систем благодаря простоте ее реализации. При разработке сложных иерархических систем осуществляют построение взаимосвязанной совокупности моделей, отображающих каждую из имеющихся подсистем, при этом данные от моделирования одной подсистемы используют в качестве исходных данных для другой. Для выбора оптимального варианта системы используют модели последовательного принятия решений.

Для отыскания решения достаточно часто применяют методы классической математики, например дифференциальное исчисление. Если невозможно выразить критерий эффективности в виде простой функции от управляемых и неуправляемых переменных, используют итеративные методы трех классов. К первым двум классам относятся методы, при реализации которых после определенного числа итераций (шагов) дальнейшее улучшение решения невозможно. Итеративные методы третьего класса являются мето-

дами проб и ошибок, при этом последовательные пробы позволяют улучшать результат, но монотонное улучшение решений не может быть гарантировано.

К итеративным методам относятся методы линейного, нелинейного и динамического программирования, применяемые в исследовании операций. Методы экспериментальной оптимизации применяются в тех случаях, когда для разработки детерминированной математической модели не хватает исходных данных по рассматриваемому процессу или решение задачи вызывает чисто математические трудности. К этим методам относятся метод случайного поиска, метод многофакторного анализа, одношаговый метод и метод наискорейшего спуска. Для систем, у которых определенное число параметров являются случайными величинами, используются методы решения задач стохастического программирования.

Применение математических моделей и необходимых методов их решения позволяет на любом технологическом переделе выбрать лучший технический процесс или метод обработки из множества возможных с учетом минимизации всех показателей ресурсосбережения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое производственная технологичность?
2. От каких факторов зависит отработка конструкции изделия (детали) на технологичность?
3. Какие действия включает в себя конструктивная ОКТ?
4. За счет чего можно обеспечить минимальную трудоемкость изготовления изделия?
5. Что такое точность обработки?
6. На каких участках детали рассматривают погрешности формы?
7. Из каких элементов складывается штучное время?
8. Опишите структуру себестоимости изготовления изделия.
9. Какие параметры наиболее полно характеризуют эффективность технологического процесса?
10. Перечислите основные направления ресурсосбережения.
11. Что такое материалоемкость изделия?
12. Почему энергоемкость процесса не является полным показателем эффективности методов обработки?
13. Что такое модель явления?
14. Какие типы моделей вы знаете?

Список литературы

Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев. — М. : Логос, 2006.

Черепяхин А. А. Материаловедение / А. А. Черепяхин, И. И. Колтунов, В. А. Кузнецов. — М. : КноРус, 2016.

Механизмы и приспособления для технического обслуживания автомобилей. Ч. 2. Оборудование для кузовного ремонта, окраски и вспомогательных работ. Справочник / А. А. Черепяхин, В. М. Виноградов, И. В. Бухтеева. — Ст. Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2016.

Черепяхин А. А. Процессы формообразования и инструменты / А. А. Черепяхин, В. В. Клепиков. — М. : Курс, ИНФРА-М, 2017.

Черепяхин А. А. Техническое обслуживание и ремонт автотранспорта / А. А. Черепяхин, В. М. Виноградов. — М. : КноРус, 2017.

Технология конструкционных материалов / [В. А. Кузнецов, А. А. Черепяхин, А. В. Шлыкова, Н. Ф. Шпунькин]. — М. : Издательский центр «Академия», 2013.

Традиционные и перспективные технологические процессы в машиностроении / [А. А. Черепяхин, В. А. Кузнецов, А. А. Смолькин и др.] ; под ред. А. А. Черепяхина и В. А. Кузнецова. — Караганда : Изд-во КарГТУ, 2016.

Франценюк И. В. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов / И. В. Франценюк. — М. : Академкнига, 2004.

Черепяхин А. А. Материаловедение / А. А. Черепяхин. — М. : Издательский центр «Академия», 2014.

Черепяхин А. А. Технология обработки материалов / А. А. Черепяхин. — М. : Издательский центр «Академия», 2016.

Оглавление

Предисловие.....	4
Глава 1. Физико-химические основы металловедения.....	5
1.1. Кристаллическое строение металлов.....	6
1.2. Дефекты кристаллической решетки.....	8
1.2.1. Точечные дефекты.....	8
1.2.2. Линейные дефекты.....	8
1.2.3. Поверхностные дефекты.....	10
1.2.4. Диффузия.....	11
1.3. Кристаллизация металлов и сплавов.....	12
1.4. Основы теории сплавов.....	15
1.4.1. Основные понятия.....	15
1.4.2. Диаграммы состояния сплавов, образующих механическую смесь.....	18
1.4.3. Диаграммы состояния сплавов, образующих твердые растворы.....	20
1.5. Фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах.....	25
1.6. Механические свойства материалов и методы их контроля.....	28
1.7. Влияние примесей на свойства сталей.....	33
1.7.1. Влияние легирующих элементов на полиморфные превращения.....	34
1.7.2. Структура и свойства легированного феррита и аустенита.....	35
1.7.3. Влияние легирующих компонентов на свойства стали.....	35
Глава 2. Конструкционные материалы, применяемые в машиностроении.....	37
2.1. Металлические конструкционные материалы.....	37
2.1.1. Черные металлы и сплавы.....	37
2.1.2. Цветные металлы и сплавы.....	42
2.1.3. Биметаллы.....	47
2.1.4. Композиционные материалы с металлической матрицей.....	48
2.1.5. Конструкционные порошковые материалы.....	50
2.2. Неметаллические материалы.....	52
2.2.1. Общие сведения.....	52
2.2.2. Пластмассы.....	55
2.2.3. Композиционные материалы с неметаллической матрицей.....	58

2.2.4. Резиновые материалы	60
2.2.5. Клеи и герметики	61
2.2.6. Лакокрасочные материалы	64
2.2.7. Древесные материалы	64
2.2.8. Прокладочные материалы	65
Глава 3. Электротехнические материалы	68
3.1. Электротехнические проводниковые материалы	68
3.1.1. Общие сведения	75
3.1.2. Металлы с высокой удельной проводимостью	75
3.1.3. Сверхпроводники	77
3.1.4. Благородные металлы	80
3.1.5. Тугоплавкие металлы	83
3.1.6. Сплавы металлов с высокой удельной проводимостью	86
3.1.7. Сплавы с низкой удельной проводимостью	87
3.1.8. Припой	91
3.1.9. Неметаллические проводниковые материалы	92
3.1.10. Композиционные проводящие материалы	95
3.1.11. Проводящие материалы на основе оксидов	96
3.2. Полупроводниковые материалы	97
3.3. Диэлектрические материалы	99
3.3.1. Классификация	99
3.3.2. Поляризация диэлектриков	100
3.3.3. Электропроводность диэлектрических материалов	103
3.3.4. Пробой диэлектриков	105
3.3.5. Пассивные диэлектрики	105
3.3.6. Активные диэлектрики	115
Глава 4. Основы термической и химико-термической обработки сталей	121
4.1. Фазовые превращения в сталях при нагреве	121
4.1.1. Превращения перлита в аустенит	121
4.1.2. Рост зерна аустенита при нагреве	122
4.2. Фазовые превращения в сталях при охлаждении	123
4.2.1. Распад переохлажденного аустенита	123
4.2.2. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении	125
4.3. Основные виды термической и химико-термической обработки деталей машин	126
4.4. Примеры термической и химико-термической обработки деталей машин	128
4.5. Инновационные методы химико-термической обработки	131
4.5.1. Поверхностное лазерное легирование стальной поверхности	131
4.5.2. Циркуляционный метод химико-термической обработки	132
4.5.3. Ионная химико-термическая обработка	133
4.5.4. Ионно-плазменное азотирование	133
4.5.5. Ионная имплантация	133

Глава 5. Основы слесарной обработки	135
5.1. Основные понятия теории базирования.....	135
5.2. Основные слесарные операции	136
5.2.1. Правка.....	136
5.2.2. Разметка.....	138
5.2.3. Рубка и резка	140
5.2.4. Опиливание и зачистка.....	144
5.2.5. Гибка металла.....	145
5.2.6. Шабрение	146
5.2.7. Нарезание резьбы метчиками и плашками.....	147
Глава 6. Обработка заготовок на металлорежущих станках	150
6.1. Резание металлов.....	150
6.1.1. Общие сведения.....	150
6.1.2. Элементы процесса резания и геометрия срезаемого слоя	152
6.1.3. Элементы и части токарного прямого проходного резца	154
6.1.4. Геометрия инструмента и ее влияние на процесс резания и качество обработки	156
6.1.5. Инструментальные материалы	157
6.1.6. Классификация современных твердых сплавов по международному стандарту ИСО 513 и определение условий их эффективного использования	162
6.1.7. Физические основы процесса резания металлов	166
6.1.8. Сила резания	168
6.1.9. Износ и стойкость режущего инструмента.....	170
6.1.10. Смазочно-охлаждающие технологические жидкости.....	171
6.1.11. Вибрации при резании материалов.....	174
6.1.12. Точность обработки.....	175
6.2. Общие сведения о металлорежущих станках	178
6.2.1. Классификация металлорежущих станков	178
6.2.2. Кинематика станков.....	180
6.3. Точение	185
6.3.1. Характеристика методов точения.....	185
6.3.2. Токарные резцы	188
6.3.3. Рабочие приспособления для токарной обработки.....	189
6.3.4. Обработка заготовок на станках токарной группы.....	191
6.4. Строгание и долбление	198
6.4.1. Характеристика методов строгания и долбления	198
6.4.2. Строгальные и долбежные резцы и рабочие приспособления	200
6.4.3. Строгальные и долбежные станки.....	202
6.5. Протягивание	204
6.5.1. Характеристика метода протягивания	204
6.5.2. Элементы и геометрия режущей части протяжек.....	205
6.5.3. Особенности процесса протягивания.....	208

6.5.4. Обработка заготовок на протяжных станках	208
6.5.5. Протяжные станки	210
6.6. Сверление	211
6.6.1. Схемы обработки поверхностей на станках сверлильной группы	211
6.6.2. Части, элементы и геометрия осевого инструмента	213
6.6.3. Основные причины неполадок при работе зенкерами и развертками	222
6.6.4. Особенности процесса сверления	223
6.6.5. Станки сверлильной группы	224
6.7. Растачивание	226
6.7.1. Особенности обработки заготовок на расточных станках	227
6.7.2. Режущий инструмент	229
6.7.3. Расточные станки	231
6.8. Фрезерование	233
6.8.1. Схемы обработки поверхностей на станках фрезерной группы	233
6.8.2. Схемы фрезерования	236
6.8.3. Особенности процесса фрезерования, режимы и силы резания, элементы и геометрия фрез	238
6.8.4. Типы фрез	243
6.8.5. Станки фрезерной группы	247
6.8.6. Технологическая оснастка, применяемая при фрезеровании	251
Глава 7. Абразивная обработка конструкционных материалов	256
7.1. Особенности процесса резания при шлифовании	256
7.2. Абразивный инструмент	259
7.3. Технологические разновидности процесса шлифования	270
7.4. Станки шлифовальной группы	278
7.5. Отделочные операции	280
7.5.1. Тонкое шлифование, прецизионное точение и фрезерование	281
7.5.2. Хонингование	282
7.5.3. Суперфиниширование и микрофиниширование	284
7.5.4. Доводка-притирка	286
7.5.5. Полирование	289
Глава 8. Электрофизические и электрохимические методы обработки поверхностей заготовок	301
8.1. Электроэрозионная обработка	301
8.2. Электрохимическая обработка	303
8.3. Электроабразивная обработка	304
8.4. Анодно-механическая обработка	305
8.5. Ультразвуковая обработка	306

Глава 9. Обработка поверхностей без снятия стружки.....	308
9.1. Обкатывание и раскатывание поверхностей заготовки	308
9.2. Калибрование отверстий	309
9.3. Вибронакатывание	310
9.4. Накатывание рифлений	310
9.5. Упрочняющая обработка поверхности.....	310
Глава 10. Основы обработки металлов давлением.....	312
10.1. Физико-механические основы ОМД	312
10.2. Ковка	314
10.3. Объемная штамповка.....	316
10.3.1. Горячая штамповка	317
10.3.2. Холодная штамповка	320
10.3.3. Листовая штамповка	321
Глава 11. Сварка и родственные процессы	326
11.1. Дуговая сварка	327
11.1.1. Характеристика дуговой сварки.....	327
11.1.2. Ручная дуговая сварка.....	329
11.1.3. Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под слоем флюса.....	331
11.1.4. Дуговая сварка в атмосфере защитных газов	333
11.2. Газовая сварка	334
11.3. Электрическая контактная сварка	337
11.3.1. Стыковая сварка.....	338
11.3.2. Точечная сварка	339
11.3.3. Роликовая (шовная) сварка	340
11.4. Пайка.....	341
11.5. Восстановление разрушенных и изношенных деталей	344
11.5.1. Восстановление деталей наплавкой	344
11.5.2. Восстановление цилиндрических деталей методом контактной приварки металлической ленты	352
11.5.3. Использование микроплазменной сварки и наплавки металла в автосервисной практике.....	355
11.5.4. Лазерная наплавка для ремонтного восстановления деталей	359
Глава 12. Ресурсосберегающая технология машиностроения	363
12.1. Технологичность конструкции детали	363
12.2. Производительность и себестоимость обработки изделия	367
12.3. Показатели эффективности производства.....	369
12.4. Энергетические уровни видов обработки	372
12.5. Комплексный метод выбора технологического процесса.....	373
Список литературы	377

Учебное издание

Черепяхин Александр Александрович

Материаловедение

Учебник

3-е издание, стереотипное

Редакторы В. А. Савосик, И. В. Могилевец

Компьютерная верстка: Р. Ю. Волкова

Корректоры С. Ю. Свиридова, Т. Г. Дмитриева

Изд. № 103119171. Подписано в печать 08.04.2019. Формат 60×90/16.

Гарнитура «Балтика». Бумага офс. № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,0.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 4517.

ООО «Издательский центр «Академия», www.academia-moscow.ru

129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Сертификат соответствия № РОСС RU.АД77.Н02114 от 31.05.2018.

Отпечатано в Акционерном обществе «Рыбинский Дом печати»

152901, г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.

e-mail: printing@r-d-p.ru www.r-d-p.ru

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ISBN 978-5-4468-8111-6



Издательский центр «Академия»
www.academia-moscow.ru