

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Основы машиностроительного производства
и профессиональное обучение»

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Учебное пособие
для студентов специальности 1-02 06 02
«Технология (по направлениям). Дополнительная специальность»

В 3-х частях

Часть 1

ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
И МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
Белорусского национального технического университета*

Минск 2004

УДК 621.9.02(075.8)

ББК 34.638

Т 38

Авторы:

И.А.Иванов, С.А.Иващенко,

В.И.Молочко, В.И.Черновец

Рецензенты:

Г.П.Кривко, Д.Ф.Устинович

Иванов И.А.

Т 38 Технология механической обработки конструкционных материалов и режущий инструмент: Учеб. пособие для студ. спец. 1-02 06 02 «Технология (по направлениям). Дополнительная специальность». В 3 ч. Ч. 1. Основы механической обработки металлов и сплавов и металлорежущий инструмент / И.А.Иванов, С.А.Иващенко, В.И.Молочко, В.И.Черновец . – Мн.: БНТУ, 2004. – 170 с.

ISBN 985-479-049-5.

Учебное пособие посвящено рассмотрению технологических основ процессов механической обработки конструкционных материалов и содержит материал лекционных и практических занятий по одноименному предмету, читаемому на IV курсе инженерно-педагогического факультета для студентов, обучающихся по специальности 1-02 06 02 «Технология (по направлениям). Дополнительная специальность». Пособие содержит основные сведения об обработке металлов и сплавов резанием, по видам обработки, режимам резания и режущему инструменту. Подробно рассмотрены инструментальные материалы, используемые в механообработке.

УДК 621.9.02(075.8)

ББК 34.638

ISBN 985-479-049-5

© Иванов И.А.,
Иващенко С.А., Молочко В.И.,
Черновец В.И., 2004

Введение

В учебном плане 12-летней школы Республики Беларусь выделен учебный предмет «Технология», который пришел на смену «Трудовому обучению». Изучение данного предмета является составной частью технологического образования школьников, цель которого – формирование целостного представления о технологической деятельности вообще. Учебный план включает в себя такие разделы, как «Технология обработки древесины» и «Технология обработки металлов и пластмасс» (иногда объединяемые в один раздел – «Технология конструкционных материалов»). Поскольку обработка резанием является одним из основных методов обработки конструкционных материалов с целью получения точных деталей машин и изделий, то углубленное изучение студентами специальности 1-02 06 02 «Технология» технологических основ механической обработки металлов, древесины и пластмасс составляет основу их профессиональной подготовки.

Курс «Технология механической обработки конструкционных материалов и режущий инструмент» читается студентам специальности 1-02 06 02 «Технология» в 7-м и 8-м семестрах и базируется на знаниях, полученных ими при изучении общенаучных и общепрофессиональных (физика, техническая механика, технология металлов и конструкционных материалов, нормирование точности и технические измерения) и специальных дисциплин (оборудование механической обработки материалов, его эксплуатация и ремонт – 6-й семестр, технологический практикум по обработке металлов и древесины – 3 – 6-й семестры). Кроме того, изучаемой дисциплине предшествуют станочные практики по металло- (4-й семестр) и деревообработке (6-й семестр), где студенты получают практические навыки работы на металлорежущих и деревообрабатывающих станках, знакомятся с основными методами механической обработки металлов и древесины, с применяемым режущим инструментом.

Таким образом, целью изучаемой дисциплины является систематизация уже имеющихся у студентов знаний в области механической обработки конструкционных материалов, формирование теоретической базы в области технологии механообработки.

Учебное пособие разделено на три логически завершенные части. Первая часть посвящена изучению общих вопросов обработки материалов резанием и основ технологии механической обработки

металлических конструкционных материалов и используемого металлорежущего инструмента. Во второй части рассматриваются особенности обработки режущим инструментом древесных материалов и пластмасс. Изучаются особенности протекания физических процессов в зоне резания, конструкции и геометрии режущего инструмента, назначения режимов резания. Третья (заключительная) часть посвящена изучению основ проектирования технологических процессов механической обработки конструкционных материалов. Рассматриваются вопросы технологического обеспечения достижения требуемой точности и качества обработанных поверхностей, построения технологических процессов и разработки отдельных операций, основного содержания технологических процессов механической обработки типовых деталей.

Авторы выражают искреннюю признательность сотруднику кафедры основ машиностроительного производства и профессионального обучения Белорусского национального технического университета В.И.Пилипенко за помощь, оказанную в оформлении графической части пособия.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

1.1. Резание как технологический способ обработки конструкционных материалов

Универсальность и гибкость процессов механической обработки обеспечивает им преимущества перед другими способами изготовления деталей, особенно в единичном и мелкосерийном производствах. Значительного сокращения металлообработки конструкционных материалов резанием ожидать нельзя, так как с каждым годом конструктивные формы деталей усложняются, повышаются их точность и требования к физико-механическим свойствам поверхностного слоя.

Обработка резанием (или механическая обработка) осуществляется режущим инструментом и ведется на соответствующем оборудовании для механической обработки материалов. Она заключается в срезании с поверхности обрабатываемой заготовки некоторого слоя материала, специально оставляемого на обработку и называемого *припуском*. Припуск удаляется одновременно с нескольких

поверхностей заготовки или последовательно с каждой обрабатываемой поверхностью. В ряде случаев он может быть настолько большим, что его срезают не сразу, а за несколько проходов. После срезаания всего припуска, оставленного на обработку, заготовка превращается в готовую деталь.

Слой материала, удаляемый в процессе резания с заготовки, называется *стружкой*. Он подвергается пластическому деформированию и разрушению, в результате которого приобретает характерную форму. Срезанная с заготовки стружка является побочным продуктом – отходом обработки материалов резанием.

Пластическое деформирование и разрушение материала припуска с превращением его в стружку протекает при резании в специфических условиях, предопределяющих закономерности процесса, отражаемые функциональными зависимостями, справедливыми только для обработки материалов резанием. Вид обрабатываемого материала может существенно влиять на характер физических процессов, протекающих в зоне резания.

Характерным признаком обработки материалов резанием является образование стружки. Таким образом, под термином *резание*, или *механическая обработка материалов* понимаются все способы и виды обработки материалов, основанные на срезании припуска и превращении его в стружку. Способы разделения материалов на части, при которых стружка не образуется (например, разрезание ножницами металлов или раскалывание древесины), к обработке резанием не относятся, т.к. эти процессы не подчиняются закономерностям теории резания материалов.

Основными методами обработки материалов резанием являются: точение, сверление, фрезерование, строгание и шлифование (рис. 1.1).

Точение – это вид токарной обработки на деревообрабатывающих и металлообрабатывающих станках токарной группы, производящейся при вращательном движении обрабатываемого изделия и поступательном движении резца.

Фрезерование – процесс резания металлов и других твердых материалов, осуществляемый на фрезерных станках – при помощи фрезы, на фуговальных и рейсмусовых станках – с помощью ножевых валов (при деревообработке). Применяется для обработки плоских и фасонных поверхностей (резьбовые поверхности, зубчатые и червячные колеса).

Сверление – процесс получения сквозных и глухих отверстий в сплошном материале на сверлильных, токарных, револьверных, расточных, агрегатных и других станках, а также при помощи ручных дрелей, с точностью изготовления отверстий в пределах 13...14 квалитетов. Отверстия более высокой точности получают после сверления растачиванием, зенкерованием, развертыванием.

Строгание – процесс обработки металлов резанием со снятием стружки, осуществляемый при возвратно-поступательном движении инструмента (строгального резца, ножа и т.п.) относительно изделия или наоборот.

Шлифование – обработка поверхности заготовок абразивным инструментом на шлифовальных или других металлорежущих станках с помощью специальных приспособлений или вручную. Высокий класс шероховатости получаемых поверхностей – до $Ra = 0,05$ мкм. Применяется для наружных и внутренних поверхностей любой формы. Существуют также обдирочное (для удаления больших припусков с литых чугунных и стальных заготовок), электрохимическое (в среде электролита) и другие виды шлифования.

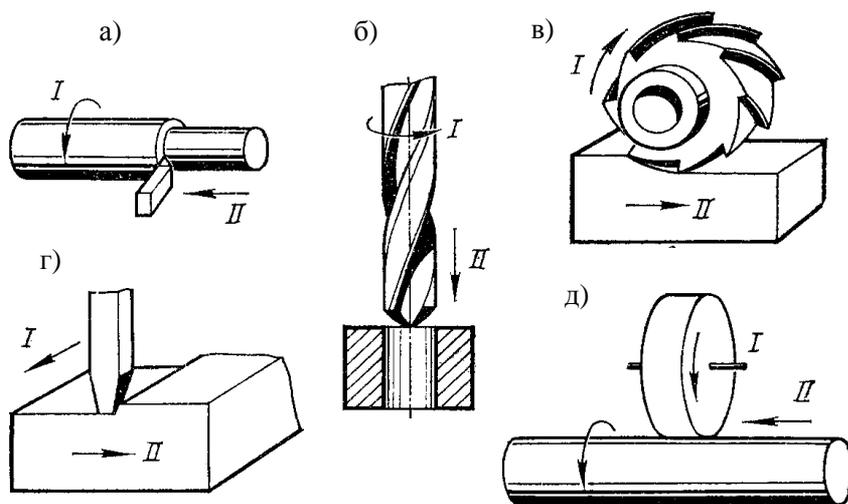


Рис. 1.1. Схемы основных методов обработки материалов резанием:

а – точение; б – сверление; в – фрезерование; г – строгание; д – шлифование;
1 – главное движение резания; 2 – движение подачи

Технологические приемы механической обработки металлов и древесины известны издревле. Ремесленники XII века применяли станки (сверлильные и токарные) с ручным приводом переменного вращательного движения детали или инструмента (рис. 1.2). В XIV – XVI веках такие приводы были заменены более совершенными, обеспечивающими непрерывное вращательное движение от водяных колес, с ручной подачей инструмента. Первый станок с механическим суппортом был создан в 1712 г. Андреем Нартовым (изобретение повторено в 1794 г. англичанином Генри Модслеем). В 1804 г., обобщая накопленный в производстве опыт, В.М. Севергин сформулировал основы технологии в работе «Технология – наука о ремеслах и заводах».

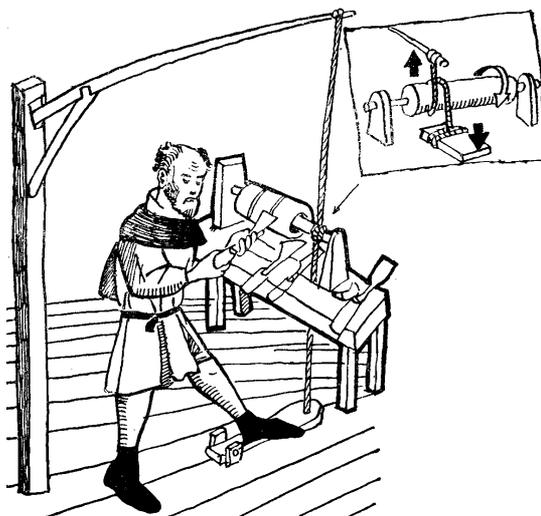


Рис. 1.2. Простейший токарный станок (XII век)

Однако первые систематические научные исследования процессов резания материалов были выполнены во второй половине XIX века. Крупный вклад в эти исследования внесли российские ученые. Так, в 1870 г. был опубликован труд И.А. Тиме «Сопrotивление металлов и дерева резанию», в котором детально изучен процесс образования стружки, предложены полуэмпирические формулы для расчета сил резания. Дальнейшее развитие вопросы механики резания получили в трудах К.А. Зворыкина, А.А. Брикса, Л.Г. Усачева. Зна-

чительный вклад в развитие станочного оборудования внесли А.В. Гадолин, Н.Н. Чернов. В 1900 г. американский ученый У. Тейлор в работе «Искусство обработки металлов» определил ряд важных положений в технологии механической обработки.

Дальнейшее развитие науки о резании материалов и основных закономерностях построения технологических процессов шло параллельно с развитием технологии механообработки. Появление быстрорежущих сталей в начале и синтетических алмазов и сверхтвердых материалов – на рубеже 60 – 70-х годов XX столетия – сделало актуальной задачу разработки нового станочного оборудования, способного работать в условиях скоростного и силового резания. Это потребовало разработки инструмента с новой геометрией режущей части, совершенствования методики назначения режимов обработки.

В соответствии с развитием технологии менялись подходы к организации технологических процессов, принципы их построения. В 70 – 80-х годах прошлого столетия разработаны вопросы групповой обработки заготовок, технологического обеспечения точности обработки и качества обработанной поверхности, совершенствования методов механической обработки материалов. Значительный вклад в развитие этих вопросов внесли А.А. Маталин, П.И. Ящерицын, В.В. Бабук и другие российские и белорусские ученые.

1.2. Кинематика процесса резания

В ходе обработки заготовки деталь и инструмент должны совершать друг относительно друга определенные заданные движения, которые называются *движениями резания*. Кроме того, при снятии стружки на заготовке (детали) образуются различные по качеству и характеру воздействия на режущее лезвие поверхности. Поэтому, прежде чем перейти к изучению курса технологии механической обработки, необходимо усвоить основные понятия и определения.

Изделие – это предмет или совокупность предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Деталь – изделие, изготавливаемое из однородного по наименованию и марке материала без применения станочных операций.

Заготовка – предмет труда, из которого путем изменения формы, размеров, свойств поверхности или материала изготавливают деталь.

Исходная заготовка – заготовка перед первой технологической операцией (штамповка, отливка, поковка, прокат).

Обрабатываемая поверхность – поверхность, которая полностью или частично удаляется при обработке.

Обработанная поверхность – поверхность, образующаяся на заготовке в процессе обработки.

Поверхность резания – поверхность, образуемая режущей кромкой резца в результате его движения; является переходной между обработанной и обрабатываемой поверхностями.

Кинематика резания рассматривает движения, которые происходят в процессе резания во время рабочего цикла, с момента, когда лезвие резца вступает в контакт с материалом заготовки, и до момента, когда контакт лезвия с заготовкой прекращается.

В процессе резания механизмы станка сообщают инструменту и заготовке поступательное и вращательное движения. Суммируясь, эти движения задают режущим лезвиям инструмента относительно заготовки **результатирующее движение резания**, которое является следствием нескольких одновременно осуществляемых движений. Различают следующие движения резания: главное движение резания, движение подачи и вспомогательные движения резания.

Главное движение резания (D_r) – поступательное или вращательное движение заготовки или режущего инструмента, происходящее в процессе резания с наибольшей скоростью V_r .

Движение подачи (D_s) – поступательное или вращательное движение заготовки или режущего инструмента, скорость которого V_s меньше скорости главного движения резания V_r .

Движение подачи позволяет снять припуск со всей обрабатываемой поверхности. Движения подачи могут различаться по направлениям.

Перемещение резца при точении параллельно оси заготовки называется **продольной подачей**; перемещение резца при точении перпендикулярно к оси заготовки – **поперечной подачей**; при этом образуется, соответственно, деталь цилиндрической формы или плоскость, перпендикулярная к оси центров.

Вспомогательные движения резания – это движения, необходимые для обеспечения процесса резания, но не связанные непосредственно со снятием стружки: например, установочные перемещения суппортов, задней бабки, поворот резцедержателя и др.

Большинство принципиальных кинематических схем резания предусматривает сочетание двух движений – главного и подачи. При токарной обработке главным движением резания является вращение обрабатываемой заготовки, движением подачи – движение резца. При сверлении главное движение определяется вращением сверла, а движением подачи является движение сверла в осевом направлении. При строгании главное движение – это перемещение резца относительно детали, или наоборот, детали относительно резца, что физически равноценно; движение подачи – перемещение обрабатываемой детали на двойной ход резца в направлении, перпендикулярном главному движению резания. При обработке заготовок шлифованием главным движением является вращение абразивного круга; движением подачи – движение обрабатываемой детали параллельно оси вращения абразивного инструмента (рис. 1.1).

Однако в сложных случаях (например, при изготовлении зубчатого колеса методом обката) требуется сочетание трех и более движений. В этом случае движения, определяющие специфику формообразования и дополняющие движение подачи, называют **дополнительными движениями резания**.

Одновременно действующие главное, дополнительное движения и движение подачи в совокупности определяют плоскостную или пространственную **траекторию результирующего движения резания** точек главной режущей кромки относительно заготовки. Каждая точка главной режущей кромки имеет свою траекторию результирующего движения. Вектор скорости этого движения всегда направлен по линии, касательной к его траектории.

Кинематика резания анализирует сочетания исходных движений, сообщаемых заготовкам и лезвиям инструментов, пользуясь **принципиальными кинематическими схемами резания**. Количественные соотношения сочетаемых движений конкретной принципиальной кинематической схемы резания определяют вид инструмента, принцип его работы и технологическое назначение.

Изложенные общие понятия справедливы для всех видов обработки режущими инструментами.

1.3. Элементы режима резания

Режим резания характеризуется глубиной резания t , подачей S и скоростью резания V .

Глубина резания (t , мм) определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по нормали к последней. При точении это – толщина слоя материала, срезаемого за один проход резца.

Подачей (S , мм/об) называется величина перемещения резца за один полный оборот заготовки. В зависимости от вида токарной обработки различают *продольную подачу* – поступательное движение резца параллельно оси вращения заготовки, *поперечную подачу* – поступательное движение резца перпендикулярно оси вращения заготовки, *наклонную подачу* – поступательное движение резца под углом к оси обрабатываемой заготовки.

Скорость резания (V , м/мин) – это скорость главного движения резания. При обработке на станках с главным вращательным движением (токарных, сверлильных, фрезерных) она равна окружной скорости точки детали или инструмента, находящейся на максимальном диаметре.

Скорость резания связана с частотой вращения детали (инструмента) следующим соотношением:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000},$$

где D – диаметр заготовки (при токарной обработке) или диаметр инструмента (при сверлении и фрезеровании), мм;

n – частота вращения детали или инструмента соответственно, об/мин.

1.4. Конструктивные элементы и геометрические характеристики токарного резца

Рабочая часть любого режущего инструмента состоит из одного или многих режущих лезвий, которые по своей геометрии представляют собой *режущий клин*. Форма режущего клина бывает различной и определяет геометрические параметры режущей части инструмента.

В данном подразделе рассматривается геометрия простейшего инструмента – токарного резца, имеющего в своем сечении режущий клин. Основные понятия и определения, вводимые здесь, спра-

ведливы при рассмотрении геометрии более сложных многолезвийных инструментов.

1.4.1. Конструктивные элементы токарного резца

Токарный резец состоит из тела (державки) и рабочей части. **Тело резца** представляет собой стержень прямоугольного, квадратного или любого другого сечения и служит для закрепления резца в резцедержателе станка (рис. 1.3). **Рабочая часть резца** участвует непосредственно в снятии стружки. Она затачивается так, что образует режущее лезвие (клин).

Элементами рабочей части резца являются следующие поверхности и кромки.

Передняя поверхность резца (4) – это рабочая поверхность его лезвия, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой.

Задние поверхности (главная 5 и вспомогательная 6) – это поверхности лезвия резца, контактирующие в процессе обработки с поверхностями заготовки. Различают **главную заднюю поверхность** – поверхность лезвия резца, обращенную в сторону обрабатываемой поверхности заготовки, и **вспомогательную заднюю поверхность**, обращенную к обработанной поверхности заготовки.

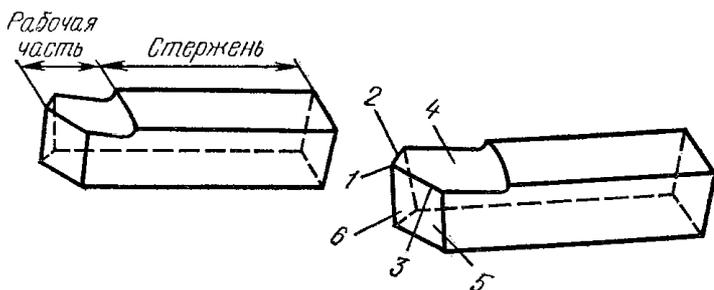


Рис. 1.3. Конструктивные элементы токарного резца:

- 1 – вершина режущего лезвия; 2 – вспомогательная режущая кромка; 3 – главная режущая кромка; 4 – передняя поверхность; 5 – главная задняя поверхность; 6 – вспомогательная задняя поверхность

Пересечение передней и главной задней поверхностей образует **главную режущую кромку** (3). При пересечении передней и вспомогательной задней поверхностей формируется **вспомогательная**

режущая кромка (2). Место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок называется **вершиной резца** (1).

Главная режущая кромка выполняет основную работу резания и, как правило, длиннее вспомогательной. Вспомогательных режущих кромок может быть две. Режущие кромки никогда не бывают абсолютно острыми. Образующие их поверхности сопрягаются по радиусу скругления. Вершина резца (место сопряжения кромок) может быть острозаточенной, закругленной или иметь переходную кромку, выполненную под углом $\varphi_0 = \varphi/2$.

1.4.2. Геометрические параметры токарного резца

Расположение режущих кромок в пространстве определяет особенности режущего лезвия и задается относительно **координатных плоскостей**.

Для определения углов заточки режущего лезвия инструмента эти плоскости задаются в статической системе координат. Статическая система координат имеет начало в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентирована относительно направления скорости главного движения резания. Углы, определенные в этой системе координат, характеризуют режущее лезвие (клин) как геометрическое тело.

Различают следующие координатные плоскости (рис. 1.4):

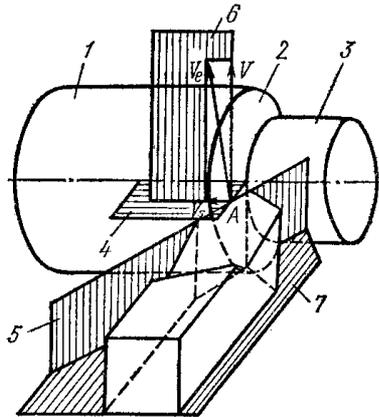


Рис. 1.4. Поверхности и плоскости при обработке резанием:
1 – обрабатываемая поверхность; 2 – поверхность резания; 3 – обработанная поверхность; 4 – основная плоскость; 5 – плоскость резания; 6 – рабочая плоскость;
7 – плоскость основания резца

Основная плоскость – плоскость, проведенная через рассматриваемую точку главной режущей кромки перпендикулярно направлению вектора скорости главного движения резания.

Плоскость резания – плоскость, проведенная через рассматриваемую точку главной режущей кромки перпендикулярно основной плоскости, в которой лежит вектор скорости главного движения резания.

Рабочая плоскость – плоскость, проведенная через рассматриваемую точку главной режущей кромки, в которой лежат векторы скоростей подачи и главного движения резания.

Углы, характеризующие режущее лезвие, делят на главные, вспомогательные и углы в плане (рис. 1.5).

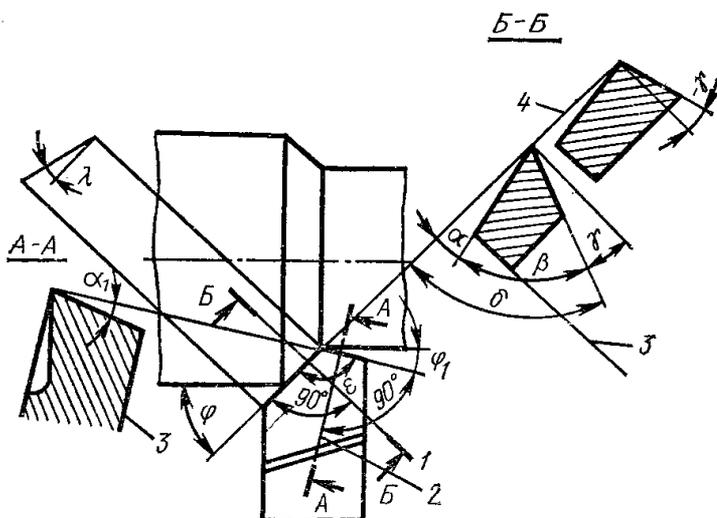


Рис. 1.5. Углы токарного резца:

- 1 – след главной секущей плоскости; 2 – след вспомогательной секущей плоскости;
3 – плоскость основания резца; 4 – плоскость резания

Главные углы рассматриваются и измеряются в **главной секущей плоскости**, перпендикулярной линии пересечения основной плоскости и плоскости резания. Различают следующие углы:

Главный передний угол γ – угол между передней поверхностью лезвия резца и основной плоскостью.

Главный задний угол α – угол между главной задней поверхностью и плоскостью резания.

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

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

Главный передний угол имеет положительное значение, если угол резания меньше 90° , отрицательное, если δ больше 90° , нулевое, если $\delta = 90^\circ$. Между главными углами существует соотношение:

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

Вспомогательные углы рассматриваются и измеряются во **вспомогательной секущей плоскости**, перпендикулярной проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость. В этой плоскости определяют те же углы, что и в главной секущей плоскости: γ_1 , α_1 , β_1 , δ_1 . Например, **вспомогательный задний угол** α_1 – это угол между вспомогательной задней поверхностью режущего лезвия резца и плоскостью, проходящей через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно основной плоскости.

Углы в плане измеряются в основной плоскости в проекции режущего лезвия резца на эту плоскость.

Главный угол в плане φ – угол между проекцией на основную плоскость главного режущего лезвия и направлением подачи S (или рабочей плоскостью).

Вспомогательный угол в плане φ_1 – угол между проекцией на основную плоскость вспомогательной режущей кромки и направлением, обратным направлению подачи S (или рабочей плоскостью).

Угол в плане при вершине ε – угол между проекциями на основную плоскость главной и режущей кромок.

Сумма этих углов

$$\varphi + \varphi_1 + \varepsilon = 180^\circ.$$

Угол наклона главной режущей кромки λ – угол в плоскости резания между главной режущей кромкой и основной плоскостью (рис. 1.6).

Угол λ положителен, когда вершина резца является нижней точкой режущей кромки; отрицателен, если вершина резца является высшей точкой режущей кромки; равен нулю, когда главная режущая кромка параллельна основной плоскости.

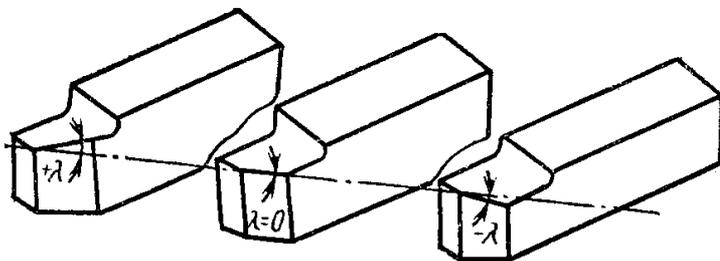


Рис. 1.6. Угол наклона главной режущей кромки

1.5. Кинематические углы токарного резца

Рассмотрим процесс обточки вала проходным упорным резцом с углом наклона главной режущей кромки, равным нулю (рис. 1.7).

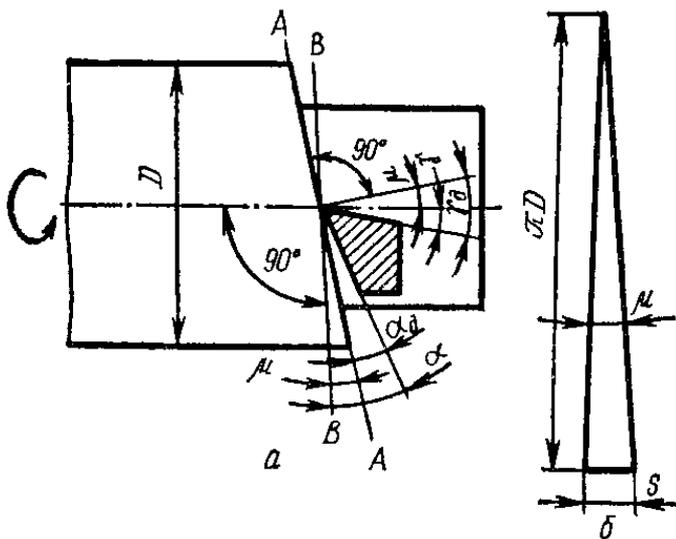


Рис. 1.7. Изменение углов α и γ в процессе резания

Вершина резца установлена по центру заготовки. При точении резцу сообщается движение подачи V_s , а заготовке – вращение вокруг своей оси (главное движение V_r). Векторное сложение величин V_r и V_s позволяет определить суммарную векторную скорость резания V_p . В этом случае траектория движения вершины резца по поверхности заготовки представляет собой спираль. Фактическая плоскость резания, касательная к рассматриваемой точке спирали, составляет с теоретической плоскостью резания угол μ , называемый углом скорости резания. Он определяется как угол между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения резания. В этом случае кинематический передний угол

$$\gamma_k = \gamma + \mu;$$

кинематический задний угол

$$\alpha_k = \alpha - \mu.$$

Как видим, кинематический задний угол меньше статического (т.е. поверхность резания в кинематике ближе к задней поверхности резца, чем в статике).

Для определения угла μ развернем на плоскость окружность вращения и винтовую траекторию точки режущей кромки. Получим прямоугольный треугольник, в котором катетами будут подача и окружность вращения, а гипотенузой – винтовая траектория. Тогда:

$$\operatorname{tg}(\mu) = \frac{S}{\pi \cdot D}; \quad \mu = \operatorname{arctg}\left(\frac{S}{\pi \cdot D}\right).$$

Как видно из выведенных соотношений для угла μ и рисунка, чем выше скорость подачи и меньше диаметр детали, тем больше величина угла μ .

Если резец имеет главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$, направление подачи и главной секущей плоскости, в которой измеряется угол α , совпадает. Если главный угол в плане $\varphi \neq 90^\circ$, угол между положениями плоскости резания, измеренный в главной секущей плоскости, можно определить по формуле

$$\operatorname{tg}(\mu_{\varphi}) = \operatorname{tg}(\mu) \sin(\varphi) \quad \text{или} \quad \operatorname{tg}(\mu_{\varphi}) = \frac{S}{\pi D} \sin(\varphi).$$

Кинематические углы в этом случае

$$\gamma_{\kappa} = \gamma + \mu_{\varphi} = \varphi + \operatorname{arctg}\left(\frac{S}{\pi \cdot D} \sin \varphi\right);$$

$$\alpha_{\kappa} = \alpha - \mu_{\varphi} = \alpha - \operatorname{arctg}\left(\frac{S}{\pi \cdot D} \sin \varphi\right).$$

Поскольку в обычных условиях скорость главного движения резания значительно превышает скорость движения подачи, а величина угла μ не превышает 1° , углом скорости резания пренебрегают, и главное движение резания определяет величину его суммарной скорости. Однако при резании с большими подачами или при нарезании крупных резьб необходимо учитывать влияние угла μ на главные углы резца.

1.6. Сечение срезаемого слоя

Сопротивление металла срезаемого слоя пластическому деформированию и образованию стружки определяется размерными параметрами – *толщиной* (a) и *шириной* (b) *срезаемого слоя*. Форма и размеры сечения срезаемого слоя зависят от принципиальной кинематической схемы резания, на основе которой осуществляются движения резания и определяется расположение режущих элементов инструмента. При продольном точении резцом размеры поперечного сечения срезаемого слоя измеряются в плоскости, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки. В этом случае площадь поперечного сечения срезаемого слоя имеет форму, близкую к параллелограмму, и является функцией подачи S (основание параллелограмма сечения) и глубины резания t (высота параллелограмма сечения).

Толщина срезаемого слоя, которая определяется как расстояние между двумя последующими положениями главной режущей кромки, занимаемыми через один цикл главного движения, в направлении,

перпендикулярном главной режущей кромке, может быть рассчитана следующим образом:

$$a = S \cdot \sin(\varphi), \text{ мм.}$$

Ширина срезаемого слоя, которая равна длине стороны сечения срезаемого слоя, образованной главной режущей кромкой, равна

$$b = t / \sin(\varphi), \text{ мм.}$$

Форма сечения срезаемого слоя (при постоянной глубине резания и подаче) зависит от формы главной режущей кромки резца и его главного угла в плане. При прямолинейной режущей кромке и φ , равном 90° , поперечное сечение среза имеет форму прямоугольника; при φ , меньшем 90° , – форму параллелограмма. При криволинейной режущей кромке поперечное сечение среза приобретает криволинейную форму с переменной толщиной среза a , изменяющейся от нуля до S (рис. 1.8).

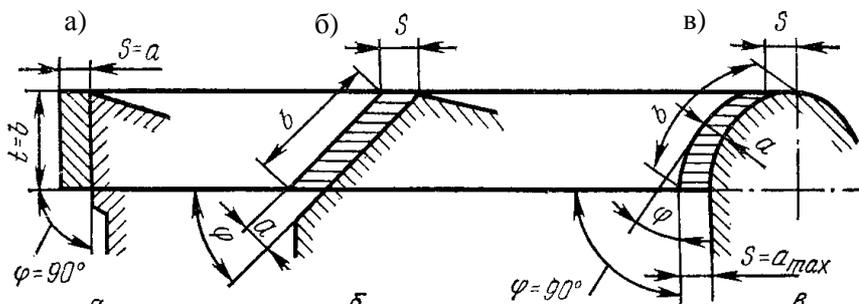


Рис. 1.8 Форма поперечного сечения срезаемого слоя в зависимости от величины главного угла в плане φ и формы режущей кромки резца

1.7. Основное технологическое время

Основным технологическим или машинным временем называется время, затрачиваемое в процессе обработки детали непосредственно на изменение формы и размеров заготовки.

В общем случае время равно пути, деленному на скорость. Путь при точении – это длина обработки; скорость в этом направлении – это скорость минутной подачи $S_{\text{мин}}$ (мм/мин):

$$S_{\text{мин}} = n \cdot S.$$

Следовательно, при токарной обработке основное (машинное) время

$$T_0 = \frac{L \cdot i}{n \cdot S}, \text{ мин,}$$

где L – расчетная длина обработанной поверхности, мм;

i – число проходов резца.

Расчетная длина складывается из длины обработанной поверхности детали l , пути врезания резца l_1 , перебега резца l_2 , пути для снятия пробных стружек l_3 :

$$L = l + l_1 + l_2 + l_3.$$

Длина пути врезания резца

$$l_1 = t \cdot \text{ctg}(\varphi).$$

Перебег резца принимают равным 1...3 мм в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки. Величина пути для снятия пробных замеров (для замеров детали) берется равной 5...8 мм. При работе на настроенных станках $l_3 = 0$ (рис. 1.9).

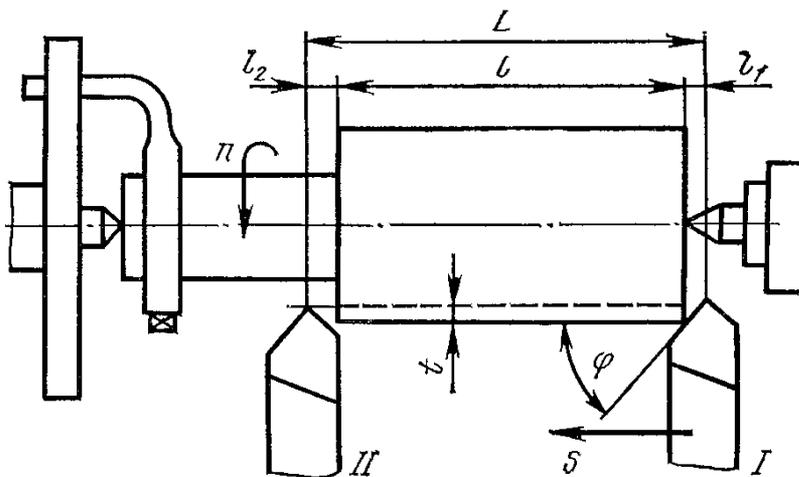


Рис. 1.9. Расчет длины хода резца при продольном точении:
1 – начальное положение резца; 2 – конечное положение резца

2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Любой режущий инструмент имеет рабочую часть, которая отделяет срезаемый слой материала от заготовки и отводит стружку из зоны резания. Рабочая часть инструмента оснащается материалами, которые называются *инструментальными*. Эти материалы должны обладать рядом свойств, которые позволяют им совершать работу резания и при этом быть удобными и дешевыми в изготовлении и эксплуатации.

2.1. Общая характеристика инструментальных материалов

Инструментальные материалы подразделяют на *стали, твердые сплавы, минералокерамику, сверхтвердые и абразивные*. Из них изготавливают измерительный и режущий инструмент, штампы холодного и горячего деформирования. Для изготовления инструментов различных типов применяются разные материалы. В ряде случаев из инструментальных материалов изготавливают только режущую (рабочую) часть инструмента, а крепежные части выполняются из конструкционных сталей (например, из стали 45, 50). Режущая часть в этом случае присоединяется к крепежной механически или припаивается. Для повышения эксплуатационных свойств инструмента на его рабочие части могут наноситься износостойкие покрытия.

Условия работы инструмента определяют применение того или иного инструментального материала для его изготовления. Характерным для эксплуатации металлорежущего инструмента является наличие больших силовых нагрузок на рабочую кромку, трения и высоких температур в зоне резания. Поэтому инструмент после изготовления подвергается термообработке для получения высокой твердости (это касается, в основном, инструмента, изготовленного из инструментальных сталей). Штамповый инструмент испытывает значительные тепловые и ударные нагрузки, поэтому большую роль играет оптимальное сочетание твердости и вязкости. Условия работы измерительного инструмента характеризуются значительно меньшими удельными давлениями на рабочие поверхности и приближаются к условиям работы режущего инструмента при легких режимах резания.

Названные условия эксплуатации инструмента определяют требования, предъявляемые к инструментальным материалам. Эти требования можно разделить на эксплуатационные и технологические.

К **эксплуатационным требованиям** относятся следующие:

1. **Износостойкость**, необходимая в связи с тем, что при эксплуатации инструментов (особенно режущих и штамповых) их рабочие кромки испытывают высокие контактные давления, вызывающие их изнашивание. Для увеличения износостойкости готовый инструмент, как правило, подвергается химико-термической обработке или нанесению на его поверхность износостойких покрытий.

2. Высокая **твердость** (не менее 60...65 HRC₃), необходимая для того, чтобы исключить пластическое течение рабочих кромок инструмента при контакте с обрабатываемым материалом. В большинстве случаев для изготовления инструментов используются высокоуглеродистые стали – заэвтектоидные и ледебуритные, сложного состава, обрабатываемые на высокую твердость. Лишь для инструментов, от которых требуется повышенная вязкость (например, штампы горячего деформирования), используются доэвтектоидные стали, твердость которых при отпуске снижается до 35...45 HRC₃. Для обеспечения высокой твердости и износостойкости большинство инструментальных сталей имеет высокое содержание углерода (0,7...1,3 %).

3. **Теплостойкость (красностойкость)**, под которой понимают способность материала сохранять высокую твердость при повышенных температурах. Оценивается наибольшей температурой нагрева, при которой сталь после закалки начинает интенсивно терять свою твердость, а значит, износостойкость. Требуемая теплостойкость инструментальных сталей достигается легированием их вольфрамом, молибденом, ванадием.

4. Высокая **механическая прочность**, необходимая в связи с тем, что работе многих инструментов сопутствуют высокие статические напряжения (чаще всего – изгиба или кручения). Для исключения поломки инструментов от этих напряжений инструментальный материал должен обладать высокой прочностью. Большое влияние на прочность оказывают внутренние напряжения, величина зерна, распределение карбидов. Прочностной характеристикой инструментальных сталей является предел прочности на изгиб $\sigma_{изг}$.

5. **Вязкость** инструментального материала, необходимая для штампов, фрез и ряда других инструментов, испытывающих удар-

ное нагружение. Значительное повышение вязкости достигается путем уменьшения содержания углерода в стали (для твердых сплавов – увеличения кобальта) и отпуском при повышенных температурах до твердости 35...45 HRC₃.

Необходимый уровень каждого из основных требований (износостойкости, теплостойкости, прочности, вязкости) для инструментов различного типа различен, причем их требуемое сочетание во многих случаях трудно обеспечить. Предпочтение отдается одному или нескольким основным требованиям, которые в наибольшей степени отвечают за работоспособность инструмента данного типа.

Кроме эксплуатационных требований, инструментальные материалы должны удовлетворять определенным **технологическим требованиям**, что особенно важно во избежание брака при изготовлении инструмента. Например, для инструментальных сталей основными технологическими требованиями являются следующие:

1. **Обрабатываемость резанием**, которая зависит от структуры сплава и наличия в нем легирующих элементов. Лучшей обрабатываемостью обладают стали со структурой зернистого перлита. Легирующие элементы, упрочняющие феррит (особенно – кремний), увеличивающие количество и твердость карбидной фазы, ухудшают обрабатываемость резанием.

2. **Шлифуемость**, при оценке которой учитывают чистоту шлифованной поверхности, чувствительность к образованию шлифовочных трещин, неизменность при шлифовании свойств поверхностных слоев (в первую очередь, твердости). Чистота поверхности при шлифовании ухудшается при наличии в структуре крупных и неоднородно распределенных карбидов. Шлифовочные трещины возникают в стали, в структуре которой имеется более 10...12 % остаточного аустенита. Изменение свойств поверхностного слоя после шлифования наблюдается при интенсивных режимах шлифования (происходит отпуск) в сталях с малой теплостойкостью. Эта опасность еще больше возрастает, если сталь обладает пониженной теплопроводностью (например, легированные стали).

3. **Закаливаемость**, под которой понимают способность стали приобретать в результате закалки мартенситную структуру и высокую твердость поверхностного слоя. Для инструментальных сталей важное значение имеет способность приобретать высокую твердость при закалке в мягких охлаждающих средах (масло, солевые растворы, воз-

дух). Применение мягких охладителей позволяет уменьшить закалочные напряжения и предотвратить образование трещин.

4. **Деформируемость**, характеризующая изменение формы инструмента при термообработке вследствие пластической деформации, вызываемой напряжениями, неоднородно распределенными в разных участках инструмента. Наименьшей деформируемостью при закалке обладают высоколегированные стали ледебуритного класса. Ослабляют деформацию при термообработке: уменьшение скорости охлаждения при закалке; применение изотермической или ступенчатой закалки; использование высоколегированных сталей и сталей с несквозной прокаливаемостью.

5. **Устойчивость против образования трещин**, которые обычно возникают при закалке в интервале температур мартенситного превращения. Вероятность образования трещин тем больше, чем сложнее форма инструмента и меньше чистота его поверхности (наличие надрезов, рисок и т.п.); возрастает с повышением температуры закалки и увеличением скорости охлаждения в области температур мартенситного превращения. Менее склонны к образованию трещин стали с исходной структурой зернистого перлита.

6. **Чувствительность к перегреву**, которую имеют стали, в структуре которых происходит быстрый рост зерна при нагреве (доэвтектоидные и эвтектоидные углеродистые стали; стали, содержащие марганец).

7. **Устойчивость против обезуглероживания**, которое может наблюдаться в поверхностных слоях стали в процессе термообработки. К факторам, увеличивающим степень обезуглероживания стали, относятся: температура; состав нагревательной среды; состав стали (например, кремний при содержании 0,8...1 %, молибден и кобальт при содержании более 3...3,5 % увеличивают склонность стали к обезуглероживанию).

2.2. Инструментальные стали

Наиболее разнообразную и важную в практическом применении группу составляют **инструментальные стали**. Область их применения значительно шире, чем других инструментальных материалов. Кроме режущего, измерительного и штампового инструмента, из них изготавливают детали точных механизмов и приборов. Инстру-

ментальные стали, используемые для изготовления металлорежущего инструмента, разделяют на *углеродистые, легированные и быстрорежущие*. В большинстве случаев это – высокоуглеродистые стали – заэвтектоидные и ледебуритные, сложного состава, подвергаемые термообработке для получения высокой твердости. Все стали делят по теплостойкости на *нетеплостойкие, теплостойкие* и *стали повышенной теплостойкости*.

2.2.1. Нетеплостойкие стали

К данной группе относятся углеродистые и низколегированные инструментальные стали с теплостойкостью до 200...250°C. Инструмент из таких сталей применяют для резания мягких материалов со скоростями резания 0,2...0,3 м/с (8...10 м/мин). Углеродистые и низколегированные инструментальные стали для изготовления машинных инструментов почти не применяются.

Углеродистые стали производят качественными (У7...У13, У8Г) и высококачественными (У7А...У13А, У8ГА). Для этих сталей характерно низкое содержание примесей Mn, Si, S, P; их особенностью является невысокая прокаливаемость (10...15 мм).

Маркировка. У – углеродистая; цифра – средняя массовая доля углерода в десятых долях процента; А – высококачественная; Г – с повышенной массовой долей марганца.

Пример чтения маркировки. У8ГА – углеродистая инструментальная сталь с повышенной массовой долей марганца и средней массовой долей углерода 0,8 %.

Углеродистые стали служили основным материалом для изготовления режущего инструмента до 70-х годов XIX века. В настоящее время они используются для изготовления слесарного, измерительного и мелкоразмерного режущего инструмента. Стали небольшой прокаливаемости У7...У13, 7ХФ...11ХФ, 13Х и др. применяются для изготовления инструмента с поперечным сечением до 10...15 мм простой формы. При больших размерах (до 25 мм) получают инструмент с вязкой незакаленной сердцевиной и поверхностным слоем с высокой твердостью и износостойкостью. Такие стали используются при изготовлении инструмента, испытывающего при работе толчки и удары, – зубил (У7), ножей по металлу (У8...У10), отверток, топоров, матриц для холодной штамповки и т.д.). Для изготовления мелкого инструмента высокой износостойкости с острой режущей кромкой

(сверл, метчиков, фрез, напильников, хирургического инструмента) применяют стали с содержанием углерода более 0,8 %.

Для увеличения прокаливаемости инструментальные стали легируют хромом и марганцем. Кроме того, для увеличения износостойкости и теплостойкости сталей их легируют карбидообразующими элементами, что позволяет в значительной степени увеличить закаливаемость, уменьшить деформацию при термообработке. Однако введение легирующих элементов снижает обрабатываемость инструментальных сталей.

Низколегированные инструментальные стали содержат до 5 % легирующих элементов.

Влияние отдельных легирующих добавок на свойства стали показано в табл. 2.1 (плюс означает улучшение, минус – ухудшение рассматриваемого свойства при введении указанной добавки; ноль говорит о том, что данное свойство стали не меняется при ее введении).

Т а б л и ц а 2.1

Влияние легирующих элементов на свойства стали

Легирующие добавки	Твердость	Пластичность	Теплостойкость	Прокаливаемость	Чувствительность к перегреву	Прочность
Хром	+	-	0	+	+	+
Вольфрам	+	0	+	+	+	+
Никель	-	+	0	+	-	0
Ванадий	+	+	0	+	0	0
Молибден	+	+	+	+	+	0
Кобальт	+	+	0	-	-	+
Титан	+	0	0	0	0	+
Марганец	+	-	0	+	-	+

Маркировка. Первые две цифры – средняя массовая доля углерода в десятых долях процента (при отсутствии цифры впереди марки близка к 1% или выше); цифры после букв – массовая доля легирующих элементов в целых единицах (отсутствие цифры указывает на то, что содержание данного легирующего элемента – около 1%; иногда содержание легирующего элемента не указывается, если не превышает 1,8%); буквы – легирующие элементы (например, Г – марганец, С – кремний, Х – хром, В – вольфрам, Н – никель, М – молибден, Ю – алюминий, Т – титан, К – кобальт, Ф – ванадий и т.д.).

Примеры чтения маркировки. X12 – легированная инструментальная сталь со средней массовой долей углерода, близкой к 1%, хрома – 12%; 3ХЗМЗФ – легированная инструментальная сталь со средней массовой долей углерода – 0,3%, хрома – 3%, молибдена – 3%, ванадия – около 1%.

Хромованадиевые стали 7ХФ...11ХФ (0,4...0,7 % Cr; 0,15...0,2 % V) применяют, в основном, для изготовления деревообрабатывающего инструмента. Стали марок ХВГ (около 1 % С, Cr, W, Mn) и ХГ относятся к малодеформирующимся. Их используют для изготовления калибров, бритвенных ножей и лезвий, длинных стержневых инструментов (т.е. инструмента, для которого важно сохранение размеров в процессе термообработки). Стали высокой прокаливаемости 6ХС...9ХС, ХГСВФ и др. позволяют получать изделия диаметром до 100 мм (что достигается за счет дополнительного легирования сплавов кремнием), используются для изготовления массивного штампового инструмента сложной формы, шариков и колец подшипников качения и т.д.

2.2.2. Теплостойкие стали

К этой группе относятся высокохромистые и хромоникелевые инструментальные стали, которые сохраняют свою твердость до 250...400°С и допускают скорость резания в 1,5...2 раза выше, чем углеродистых сталей.

Полутеплостойкие стали по эксплуатационным и технологическим свойствам делятся на две группы:

1) стали для изготовления инструментов для обработки металлов и других материалов в холодном состоянии (деревообрабатывающих, ножовочных полотен, зубонакатных, матриц и пуансонов холодного деформирования, – например: стали Х6ВФ, 4ХС и др.);

2) стали для изготовления инструментов для обработки металлов давлением при температуре выше 300°С (хромоникелевые стали 5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ и др., используемые для изготовления штампов горячего деформирования).

Особую группу составляют стали, из которых изготавливается измерительный инструмент. Основные свойства, которыми должны обладать стали этого назначения, – высокая износостойкость, постоянство размеров и формы в течение длительного срока службы.

К дополнительным требованиям относится возможность получения низкой шероховатости поверхности и малой деформации при термической обработке. Наиболее широко применяются заэвтектоидные низколегированные стали X, ХГ, ХВГ, 9ХС, обрабатываемые на высокую твердость (60...64 HRC₃). Плоские инструменты (скобы, линейки, шаблоны и т.п.) нередко изготавливаются из листовых сталей 15, 20, 15Х, 20Х, 12ХН3А, подвергаемых цементации, или из сталей 50 и 55, закаливаемых с поверхностным нагревом ТВЧ. Для инструментов сложной формы и большого размера применяют азотируемую сталь 38Х2МЮА.

2.2.3. Стали повышенной теплостойкости

Эту группу составляют быстрорежущие стали – высоколегированные, предназначенные для изготовления инструментов высокой производительности.

Маркировка. Буква Р в начале означает, что сталь относится к быстрорежущим; цифра после буквы Р – массовая доля W в %; цифры после других букв – массовая доля легирующих элементов в %.

В обозначении марок быстрорежущих сталей не указывается массовая доля: хрома – при любой массовой доле; молибдена – до 1 % включительно; ванадия – в сталях марок Р18, Р9, Р6М5, Р9К5, Р6М5К5, Р9М4К8, Р2АМ9К5; азота – в сталях марок 11РЗАМЗФ2, Р2АМ9К5.

Примеры чтения маркировки. Р9М4К8 – быстрорежущая сталь с массовой долей вольфрама – 9 %, молибдена – 4 %, кобальта – 8%.

Стали повышенной теплостойкости сохраняют свои свойства до 550...600°С. Инструменты из этих сталей допускают работу на скоростях, в 3...5 раз превышающих скорость работы инструмента из углеродистых сталей (20...60 м/мин). Основой высоких режущих свойств этих сплавов является наличие в них больших количеств карбидообразующих элементов (W, Cr, V, Mo).

Первые инструменты, изготовленные из быстрорежущей стали, были впервые продемонстрированы на Всемирной промышленной выставке в Брюсселе в 1910 году. По своему химическому составу эта сталь была близка к марке Р18, которая до 70-х годов XX века считалась лучшей быстрорежущей сталью. В настоящее время из быстрорежущих сталей изготавливают режущий инструмент всех

видов, рабочие части штампов (например, пуансоны высадочных штампов горячего деформирования), измерительный инструмент. Наибольшее распространение для изготовления дереворежущего инструмента получили высоколегированные стали марок Х6ВФ, 9Х5ВФ, 8Х4В4Ф1, 8МЗФ3С, 5ХЗВ3МФС, 8Х6НФТ, а также быстрорежущие инструментальные стали (например, Р6М5К5).

В последние годы из-за дефицитности вольфрама ведутся интенсивные работы по созданию безвольфрамовых быстрорежущих сталей. Например, безвольфрамовая сталь 11М5Ф (1,1% С, 5,5% Мо, 4,0% Cr, 1...1,5% V) имеет твердость после закалки 63...65 HRC₃ и теплостойкость 620°C. Она предназначена для обработки отожженных и легированных конструкционных сталей, медных и алюминиевых сплавов.

Перспективными направлениями являются изготовление режущих инструментов методами порошковой металлургии и разработка сталей, содержащих карбиды или карбонитриды – карбидосталей. Изготовление быстрорежущих сталей методами порошковой металлургии (например, стали марок Р6М5К5-МП, 13Р6М5Ф3-МП и др., где МП – порошковая металлургия) позволяет создать однородную мелкозернистую структуру, способствующую повышению прочности и износостойкости инструмента (в среднем в 1,2...2 раза), улучшению обрабатываемости резанием, уменьшению радиуса скругления режущей кромки. Карбидостали – композиционный материал, в котором зерна тугоплавких карбидов (преимущественно, TiC) равномерно распределены в связке из легированной стали. Наиболее известны марки карбидостали Р6М5-КТ20 и Р6М5К5-КТ20 с массовой долей TiC 20%. Их твердость достигает 70...72 HRC₃, теплостойкость – 650...700°C. Стойкость фрезерного инструмента из карбидосталей в 10 раз выше, чем из стали Р18, и в 2 раза выше, чем из стали Р7М2Ф6М5-МП.

2.3. Твердые сплавы и сверхтвердые инструментальные материалы

2.3.1. Твердые сплавы

Их получают методами порошковой металлургии в виде пластинок путем спекания в электрических печах при температуре около

1500°С порошков высокотвердых тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала и металлической связки – кобальта.

В зависимости от состава карбидной основы различают три группы твердых сплавов: *вольфрамовые* (WC, Co – связка), *вольфрамо-титановые* (WC, TiC, Co – связка) и *вольфрамо-титано-танталовые* (WC, TiC, TaC, Co – связка).

Маркировка. В – вольфрамовая группа сплавов; Т – титано-вольфрамовая группа сплавов; ТТ – титано-тантало-вольфрамовая группа сплавов; К – кобальт; цифра после буквы К – массовая доля кобальта в %; цифра после буквы Т – массовая доля карбида титана в %; цифра после букв ТТ – суммарная массовая доля карбидов титана и тантала в %. В конце маркировки возможны следующие буквы: М – сплавы, изготовленные из мелких порошков WC; ОМ – сплавы, изготовленные из особо мелких порошков WC; В – сплавы, изготовленные из крупнозернистого WC; ВК – сплавы из особо крупного WC; КС – сплавы, изготовленные из WC, полученного при высоких температурах, отличающиеся крупной зернистостью, но подвергнутые размолу до средней зернистости.

Твердые сплавы, выпускаемые зарубежными фирмами, в соответствии с классификацией Международной организации по стандартизации (ISO) разделяются на группы по областям их применения, а не по составу, как это принято в нашей стране. Состав каждой марки, как правило, не указывается ни одной из зарубежных фирм. По классификации ISO сплавы делятся на три основные группы:

1) K01...K50 – твердые сплавы для обработки чугуна и цветных металлов;

2) P03...P40 – для обработки стали;

3) M10...M30 – универсальные, переходные от группы Р к группе К, предназначенные для черновой обработки стали и чугуна.

Примеры чтения маркировки. ВК6-ОМ – спеченный твердый сплав вольфрамовой группы с массовой долей кобальта – 6%, карбида вольфрама – 94%; Т15К6 – спеченный твердый сплав титано-вольфрамовой группы с массовой долей карбида титана – 15%, кобальта – 6%, карбида вольфрама – 79%; ТТ7К12 – спеченный твердый сплав титано-тантало-вольфрамовой группы с суммарной массовой долей карбидов титана и тантала – 7%, кобальта – 12%, карбида вольфрама – 81%.

Твердые сплавы (твердость 87...92 HRC) обладают высокими износостойкостью и теплостойкостью (800...1000°C), что позволяет вести обработку изделий со скоростями резания до 15 м/с.

Первые твердые карбидо-вольфрамовые сплавы были получены методами порошковой металлургии в 1926 г. В настоящее время 80...90 % всех токарных резцов снабжены неперетачиваемыми твердосплавными пластинами. Общая доля используемого в машиностроении твердосплавного инструмента постоянно увеличивается в связи с тем, что таким инструментом можно не только вести обработку на повышенных скоростях, но и обрабатывать заготовки из закаленных (67 HRC₃) и труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Сплавы группы ВК идут, в основном, для обработки заготовок из хрупких металлов, пластмасс, неметаллических материалов; сплавы с большим содержанием кобальта – для чернового точения. Например, для обработки чугунов используют сплав ВК8, для обработки цветных металлов и их сплавов – ВК4, ВК6, ВК8. Фрезерование древесины и прессованных опилок проводят фрезами, оснащенными режущими пластинками из сплава ВК15.

Сплавы других групп применяются, в основном, для обработки пластичных и вязких материалов и сплавов и обработки заготовок по литевой корке. Например, при черновом точении по корке с ударным нагружением преимущественно используются сплавы Т5К10 (для легированных сталей) и ТТ7К12 (ВК8) (для труднообрабатываемых материалов). При получистовом точении легированных сталей применяются сплавы Т15К6, Т5К10, труднообрабатываемых и коррозионностойких сталей аустенитного класса – ВК4, ВК8. Для чернового точения при прерывистом резании используются инструменты, оснащенные сплавами группы Т или ТТ – Т30К4, Т15К6 (при обработке углеродистых сталей), Т5К10 (при обработке закаленной стали).

В деревообработке, особенно при обработке труднообрабатываемых древесных материалов (клееной древесины, древесно-стружечных ДСтП- и волокнистых ДВП-плит, бумажно-слоистого пластика и др.), широкое применение нашли литые твердые сплавы – стеллиты и сормайты. Стеллиты (ВЗКР, ВЗК) представляют собой сплавы на кобальтовой, а сормайты (№ 1, № 2) – на железной основе. Износостойкость литых твердых сплавов ВЗК – в 3...4 раза выше, чем легированных сталей, а марки ВЗКР – в 6...7 раз. Данные

сплавы применяют, в основном, для наплавки зубьев ленточных и рамных пил электродуговой или газовой сваркой.

Химический состав литых твердых сплавов:

стеллит:

ВЗКР – 1,6...2 % С, 28...32 % Cr, 9 % W, 45 % Co, 0,4...1,2 % Mn, 0,1...2 % Ni, 0,5...1,2 % Si, 2 % Fe;

ВЗК – 1...1,3 % С, 28...32 % Cr, 28...32 % W, 28...32 % Co, 0,5...2 % Ni, 2...2,7 % Si, 2 % Fe;

сормайт:

№ 1 – 4 % С, 30 % Cr, 2 % Mn, 4 % Ni, 4 % Si, 56 % Fe;

№ 2 – 2 % С, 15 % Cr, 1 % Mn, 2 % Ni, 2 % Si, 78 % Fe.

2.3.2. Минералокерамические твердые сплавы

Основу минералокерамики составляет окись алюминия (технический глинозем) Al_2O_3 с небольшими добавками окиси магния MgO (от 0,5 до 1 %). В промышленности используется минералокерамика марки ЦМ-332 в виде различной формы пластин белого цвета, получаемых спеканием спрессованных порошков при температуре 1700...1800°C. Твердость получаемых таким образом минералокерамических сплавов составляет 91...93 HRA, теплостойкость – 1200°C. Минералокерамика не содержит дорогостоящих и дефицитных материалов (таких как вольфрам), не окисляется в процессе резания, имеет меньшую склонность к слипанию с материалом детали из-за высокой температуры схватывания (около 1600°C), в связи с чем при обработке допускаются высокие скорости резания (свыше 200 м/мин) с обеспечением размерной стойкости инструмента, оснащенного такими пластинами.

Недостатком минералокерамики является то, что по теплопроводности она уступает твердым сплавам, а ее прочность на изгиб – в 2...4 раза ниже, поэтому инструмент, оснащенный минералокерамическими пластинами, применяется для чистовой обработки конструкционных, легированных, жаропрочных и других сталей при отсутствии ударных нагрузок.

Улучшенные минералокерамические сплавы, состоящие из соединений окиси алюминия и сложных карбидов вольфрама и молибдена, носят специальное название – керметы. Эти сплавы обладают более высокими эксплуатационными свойствами, чем минера-

локерамика, и могут использоваться при работе в условиях ударного нагружения режущей части инструмента. Например, пластинки кермета марок ВОК60 (состав: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, твердость 94 HRA) и картинита (состав: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$, твердость 93 HRA) предназначены для чистовой и получистовой обработки закаленных сталей (45...60 HRC₃) и чугунов с малыми сечениями среза для работы без удара (ВОК60) и для работы в условиях прерывистого резания (картинит). Пластинки кермета марки СС680 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Si}_3\text{N}_4$) применяются для черновой предварительной обработки чугунов.

2.3.3. Сверхтвердые инструментальные материалы

Они выпускаются на основе плотных модификаций кубического нитрида бора (CBN). Поликристаллы кубического нитрида бора превосходят по теплостойкости все материалы, применяемые для лезвийного инструмента: алмаз – в 1,9 раза; быстрорежущие стали – в 2,3 раза; твердый сплав – в 1,7 раза; минералокерамику – в 1,2 раза. CBN изотропен, обладает микротвердостью, близкой к твердости алмаза, имеет высокую теплопроводность и химическую инертность к углероду и железу. Применение инструмента из CBN позволяет повысить его стойкость при обработке чугунов в 3...4 раза по сравнению с инструментом из твердого сплава. Большинство инструментальных материалов из кубического нитрида бора имеют теплостойкость до 1400°C.

В машиностроительном производстве применяются следующие марки: композит 01 (эльбор) и композит 02 (белбор) используются для тонкого и чистового точения резцами в условиях безударной нагрузки и торцового фрезерования чугунов любой твердости и сплавов с содержанием кобальта более 15 %. Композит 10 (гексанит) применяют для предварительного и окончательного точения твердых сплавов в условиях безударной или ударной нагрузки (с наличием на обрабатываемой поверхности отверстий, пазов, ребер). Из композита 05 изготавливают инструмент для предварительного и чистового точения и торцового фрезерования закаленных деталей из чугунов любой твердости с наличием поверхностной литевой корки.

К этой группе инструментальных материалов можно отнести материалы, содержащие композицию Si-Al-O-N, – так называемые сиалоны, – основу которых составляет соединение Si_3N_4 : например,

пластины "Сиалон" и "Кион 2000" (состав $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al N}$), предназначенные для обработки чугуна и сталей аустенитного класса с припусками до 12 мм.

2.4. Абразивные материалы

К *абразивным материалам (или абразивам)* относят материалы высокой твердости, которые в измельченном состоянии способны осуществлять обработку резанием. Абразивные материалы в виде зерен порошков различной крупности применяются для изготовления шлифовального инструмента (круги, бруски и т.п.), а также используются в свободном состоянии при шлифовании, полировании и других видах окончательной обработки.

Существуют *природные* (наждак, кварцевый песок, гранат, корунд) и *искусственные* (электрокорунд, карбид кремния или бора, техническое стекло) материалы. В качестве абразивов могут использоваться порошки эльбора-Л, алмаза, металлическая крошка твердых сплавов, отбеленного чугуна. В ряде случаев при полировании материалов используются и сравнительно мягкие материалы – глинозем, окись хрома и др.

Абразивные материалы имеют высокие твердость, износостойкость и теплостойкость (1800...2000°C). Инструменты из абразивных материалов позволяют обрабатывать детали со скоростью резания 15...100 м/с. Шлифование абразивным инструментом используется, главным образом, для окончательной обработки заготовок, когда к ним предъявляются повышенные требования по точности и шероховатости обработанных поверхностей. Природные абразивные материалы используются для обработки дерева, пластмассы, кожи, эбонита. Корунд 92Е используется для полирования деталей из стекла и металлов. Из наждака изготавливают шлифзерно для производства мельничных жерновов.

Искусственные абразивные материалы, обладая большей стабильностью физико-механических свойств, чем природные, резко ограничили применение последних, а в ряде случаев вытеснили их.

Электрокорунды – абразивные материалы, состоящие из корунда (90...99% Al_2O_3) и небольших примесей. Промышленностью выпускается нормальный (13А...15А), белый (23А...25А), хромистый (33А, 34А), титанистый (37А), циркониевый (38А) корунды, моно-

(43А...45А) и сферокорунд. Электрокорунды применяются для изготовления абразивного инструмента на керамической связке, в том числе прецизионного классов АА и А. Основная область применения электрокорундов – обработка заготовок из материалов с высокой прочностью на разрыв, шлифование закаленных и незакаленных углеродистых сталей, обдирочное шлифование. Из сферокорунда изготавливаются абразивные инструменты на различных связках для обработки мягких и вязких материалов – кожи, резины, пластмассы, цветных материалов.

Карбиды. Наиболее широко применяются в машиностроительном производстве карбиды бора (теплостойкость – 700...800°С) и кремния (теплостойкость – 1300...1400°С). Карбид бора в виде порошков и паст применяется для доводочных операций (например, доводки твердосплавного инструмента); черный карбид кремния (53С...55С) – для обработки вязких материалов. Карбиды применяются в виде абразивного инструмента, шкурки и для обработки свободным зерном.

Техническое стекло применяется, в основном, для изготовления шлифовальной шкурки, предназначенной для обработки дерева.

Основной характеристикой абразивных материалов является **зернистость**, которая характеризует размер режущих зерен основной фракции в данном материале. **Фракция** – это совокупность абразивных зерен в установленном интервале размеров. Преобладающую по массе, объему или числу зерен фракцию называют **основной**.

По размеру зерна основной фракции шлифматериалы делят на группы:

- 1) шлифзерно – 2000...160 мкм (№ 200 – 16);
- 2) шлифпорошки – 125...40 мкм (№ 12 – 4);
- 3) микрошлифпорошки – 63...14 мкм (М63 – М14);
- 4) тонкие микрошлифпорошки – 10...3 мкм (М10 – М5).

При выборе зернистости необходимо помнить следующее: чем крупнее зерно, тем производительнее процесс шлифования, но возрастает высота неровностей обрабатываемой поверхности. Абразивные инструменты с мелким зерном более склонны к засаливанию; их применяют для чистового шлифования, а крупнозернистые – для чернового.

Абразивная способность шлифовального материала – это его способность производить сьем поверхностного слоя обрабатываемого материала. Она характеризуется отношением массы снятого материала к массе израсходованного шлифовального материала при заданных условиях.

В порядке повышения абразивной способности материалы располагаются в последовательности: электрокорунд, карбид кремния, эльбор, алмаз.

Принятые условные обозначения абразивных материалов, используемых для изготовления режущего инструмента, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Условные обозначения абразивных материалов

Наименование абразивного материала	Обозначение материала	Разновидности абразивного материала
Электрокорунд нормальный	1А	12А...16А
Электрокорунд белый	2А	22А...25А
Электрокорунд хромистый	3А	32А...34А
Электрокорунд титанистый	3А	37А
Монокорунд	4А	43А...45А
Карбид кремния черный	5С	53С...55С
Карбид кремния зеленый	6С	63С, 64С
Корунд природный	9Е	92Е
Алмаз природный	А	А, АМ, АН
Алмаз синтетический	АС	АСО, АСП, АСВ, АСК
Эльбор-Л (кубический нитрид бора)	Л	ЛО, ЛП
Техническое стекло	7Г	71Г

Зернистость шлифзерна и шлифпорошков обозначается как 0,1 размера стороны ячейки сита в свету в микрометрах, на котором задерживаются зерна основной фракции. Зернистость микрошлифпорошков и тонких микрошлифпорошков обозначают по верхнему пределу размера основной фракции. Однородность зернового состава, существенно влияющая на шероховатость обрабатываемой поверхности, режущие свойства и стойкость инструмента, характеризуется процентным содержанием основной фракции. Поэтому условное обозначение зернистости дополняют буквенным индек-

сом, соответствующим этому процентному содержанию: В – высокое (только для микропорошков); П – повышенное; Н – номинальное; Д – допустимое (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Зернистость абразивных материалов и их условное обозначение

Индекс	Зернистость				
	200-8	6-4	M63-M28	M20-M14	M10-M5
В	-	-	60	60	55
П	55	55	50	50	45
Н	45	40	45	40	40
Д	41	-	43	39	39

Пример обозначения шлифзерна: 40-П, 40-Н, 40-Д – шлифпорошки зернистостью 40 (размер стороны ячейки сита в свету, на котором задерживаются зерна основной фракции, – 400 мкм) с содержанием основной фракции не ниже: П – 55%, Н – 45%, Д – 41%.

Таблица 2.4

Области применения шлифовальных материалов
в зависимости от их зернистости

Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Индекс зернистости				Изготавливаемый инструмент и виды выполняемых работ
		В	П	Н	Д	
1	2	3	4	5	6	7
Шлифзерно и шлифпорошки						
200	2500...2000	-	55	45	41	Для ручных обдирочных операций, зачистки отливок, сварных швов проката, правки шлифовальных кругов
160	2000...1600					
125	1600...1250					
100	1250...1000					Для плоского шлифования торцом круга, отрезных работ, предварительного шлифования закаленных сталей и чугунов со снятием большого припуска
80	1000...800					
63	800...630					
50	630...500					

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7
40	500...400	-	-	54	41	Для предварительного и окончательного шлифования закаленных сталей и чугунов с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 2,5 \dots 0,63$ мкм, заточки режущего инструмента
32	400...315					
25	315...250			43	39	
20	250...200	-	-	45	41	Для чистового шлифования с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 2,5 \dots 0,32$ мкм, профильного шлифования, заточки мелкогабаритного режущего инструмента
16	200...160					
12	160...125	-	55	40	36	Для профильного шлифования с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,63 \dots 0,16$ мкм, чистовой заточки и доводки инструмента, предварительного хонингования, шлифования резьб с крупным шагом Для шлифования хрупких материалов и резьб с мелким шагом, доводки и хонингования с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,03 \dots 0,16$ мкм
10	125...100					
8	100...80					
6	80...63					
5	63...50					
4	50...40					
Микрошлифпорошки и тонкие микрошлифпорошки						
M63	63...50	60	50	45	42	Для суперфиниширования, окончательной доводки и хонингования с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,16$ мкм и менее
M50	50...40					
M40	40...28					
M28	28...20					
M20	20...14					
M14	14...10					
M10	10...7	55	45	40	37	
M7	7...5					
M5	5...3					

Алмазные материалы. Алмаз, самый твердый из всех известных в природе минералов, представляющий собой кристаллическую модификацию углерода, обладает чрезвычайно высокой износостойкостью. Например, износостойкость алмаза при трении по закаленной стали в 100...200 раз выше, чем у абразивных материалов, и в 5000...10000 раз выше, чем у твердых сплавов. Благодаря высокой

теплопроводности использование алмазных материалов гарантирует получение деталей с бесприжоговой поверхностью.

Применяемые в промышленности алмазные материалы разделяют на природные и синтетические.

Природный алмаз обладает наивысшими твердостью и износостойкостью. Он используется, главным образом, на операциях, где необходимы исключительно высокая износостойкость и повышенная абразивная способность инструмента при обработке твердых и сверхтвердых материалов. Например, из алмаза марок А1, А2, А3 изготавливают инструмент на металлической связке для шлифования технического стекла, керамики, камня, бетона. Из алмаза марок А5 и А8 изготавливают правящий и буровой инструменты.

Синтетический алмаз превышает по твердости эльбор, обладает высокой износостойкостью и пониженной теплостойкостью, химически активен к железу, имеет повышенную хрупкость и пониженную прочность, что способствует самозатачиванию. Синтетический алмаз каждой последующей марки (от АС2 до АС50) отличается от предыдущего более высокой прочностью и меньшей хрупкостью.

Области применения некоторых синтетических алмазов следующие: АС2 – для чистовых операций при обработке твердых сталей; АС32 – при работе в тяжелых условиях, бурении, резке камня и т.п.; АРВ1 – для хонингования чугунов, резки стеклопластиков; АСМ – для паст при доводке; АСМ5 – для паст при доводке деталей радиотехнической промышленности.

В деревообработке синтетические алмазы используются для заточки и доводки твердосплавного дереворежущего инструмента.

Марки синтетических алмазов. В зависимости от размера зерен и метода их получения синтетические алмазы делят на две группы: шлифпорошки и микропорошки. Шлифпорошки выпускаются пяти марок: АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС; микропорошки – двух марок: АСМ и АСН.

Алмазы марки АСО имеют зерна с шероховатой, наиболее развитой поверхностью и повышенной хрупкостью, обладают хорошими режущими свойствами, работают с минимальным потреблением энергии и выделением тепла. Они рекомендуются для использования в инструментах на органической связке с применением смазывающе-охлаждающих жидкостей и без них.

Алмазы АСР имеют зерна с меньшей хрупкостью, чем АСО, развитую поверхность, хорошо удерживаются в связке. Рекомендуются для изготовления инструмента на органических, керамических и металлических связках.

Алмазы АСВ имеют зерна с меньшей хрупкостью и большей прочностью, чем АСО и АСР, и более гладкую поверхность. Рекомендуются для изготовления инструмента на металлических связках, работающего при больших давлениях.

Алмазы АСК имеют зерна с меньшей хрупкостью и большей прочностью по сравнению с зернами АСО, АСР, АСВ. Рекомендуются для изготовления инструмента на твердых металлических связках, применяемого в особо тяжелых условиях работы, для резки и обработки природного камня (гранита, мрамора, известняка) и других твердых материалов.

Алмазы АСС имеют зерна блочной формы. Их прочность выше прочности природных и синтетических алмазов. Алмазы этой марки рекомендуются для изготовления бурового инструмента, правки абразивных кругов, резки и обработки корунда, рубина и других особо твердых материалов.

Алмазные абразивные материалы выпускают в виде порошков по ГОСТ 9206-80Е. В зависимости от размера зерен и способа получения порошки разделяются на шлифпорошки (размер зерен – 3000...40 мкм), микропорошки (80...1 мкм и менее), субмикропорошки (1...0,1 мкм и менее). Зернистость обозначается дробью, в числителе которой – число, равное размеру ячейки сита (в микрометрах), через которую проходят зерна основной, преобладающей по массе фракции, в знаменателе – число, равное размеру ячейки сита, на котором зерна задерживаются.

В зависимости от разности размеров ячеек верхнего и нижнего сит зернистость шлифпорошков может соответствовать узкому (63/40...2500/1600) или широкому (50/40...2500/2000) диапазону. Микропорошки и субмикропорошки имеют зернистость 1/0...60/40.

Маркировка. По виду сырья алмазные порошки разделяются на порошки из *природных* (обозначаются А), *синтетических* (АС) и *синтетических поликристаллических* (АР) алмазов. К этим обозначениям добавляют: для шлифпорошков – цифровой индекс, соответствующий 0,1 процентного содержания зерен изометрической формы; для порошков из синтетических алмазов – цифровой индекс,

характеризующий прочность на сжатие зерен данного материала; для поликристаллических алмазов – буквенный индекс (Б – баллас, К – карбонадо, С – спеки). Алмазные микропорошки и субмикропорошки нормальной абразивной способности обозначают буквами АМ и АСМ, повышенной производительности – АН и АСН. К обозначению субмикропорошков добавляют процентное содержание зерен крупной фракции.

Примеры чтения маркировки:

шлифпорошок АС6 160/125, ГОСТ 9206-80Е – шлифпорошок из синтетического алмаза марки АС6 зернистостью 160/125 по ГОСТ 9206-80Е;

микропорошок АСМ 40/28, ГОСТ 9206-80Е – микропорошок из синтетического алмаза марки АСМ нормальной абразивной способности зернистостью 40/28 по ГОСТ 9206-80Е;

субмикропорошок АСМ5 0,5/0,1, ГОСТ 9206-80Е – субмикропорошок из синтетического алмаза марки АСМ5 нормальной абразивной способности зернистостью 0,5/0,1 по ГОСТ 9206-80Е.

Эльборовые материалы выпускаются в виде порошков, применяемых для изготовления эльборового инструмента и для свободного резания. В зависимости от размера зерна они разделяются на шлифзерно (размеры зерен – 160...500 мкм), шлифпорошки (40...120 мкм), микрошлифпорошки (1...63 мкм). Обозначение зернистости эльборовых материалов аналогично обозначению алмазных материалов узкого диапазона зернистости.

В зависимости от вида сырья, способа получения, наличия покрытий и прочности эльбор производится следующих марок: ЛО – обычной механической прочности; ЛП, ЛКВ – повышенной прочности; ЛД – поликристаллический; ЛОМ, ЛОС – с покрытиями.

3. ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

3.1. Физические явления, сопровождающие процесс резания металлов

3.1.1. Процесс образования и виды стружек

Процесс образования стружки является одним из сложных физических процессов. Он сопровождается трением, интенсивным теп-

ловыделением, наростообразованием, завиванием и усадкой стружки, повышением твердости деформируемых слоев металла и износом режущего инструмента. При этом возникают упругие и пластические деформации.

При резании пластичных материалов резец под действием определенной силы производит сжатие впередилежащих слоев металла. Частицы металла сначала упруго сжимаются, а затем наступает пластическая деформация, которая увеличивается до тех пор, пока не будет преодолена сила внутреннего сцепления частиц металла. В этот момент происходит скалывание элементов стружки и дальнейший их сдвиг в плоскости ОА, называемой плоскостью скалывания (рис. 3.1). Касательные напряжения в каждой точке этой плоскости максимальны. Угол скалывания Φ определяет положение плоскости ОА и зависит от значений коэффициента утолщения стружки K_a и переднего угла γ :

$$\operatorname{tg}\Phi = \cos \gamma / (K_a - \sin \gamma),$$

где $K_a = a_1/a$.

Замеряя толщину стружки и зная угол γ и толщину срезаемого слоя a , можно определить значения K_a и угла Φ . Угол скалывания для пластичных материалов рассчитывают по формуле

$$\Phi = (20 \dots 25) + \gamma.$$

Контуры пластической зоны при сливной стружке показаны на рис. 3.1. Перед зоной ODEF металл упруго деформирован. ODE – граница начала пластической деформации; FHC – граница области стружки, в которой заканчивается деформация. Толщина деформированного слоя a_3 обработанной поверхности зависит от свойств обрабатываемого материала и нагрузки. Деформация стружки осуществляется во всех направлениях и сопровождается уширением (т.е. изменением параметров срезаемого слоя по толщине) и укорочением (когда длина срезаемой стружки получается меньше длины пути, пройденного резцом по поверхности резания) стружки. Твердость образующейся стружки в 1,5...4 раза превышает твердость исходного материала. Явление укорочения стружки по длине и

уширения по толщине называют *усадкой стружки*. Величина этой усадки зависит от угла резания, толщины среза, скорости резания и принятых условий обработки.

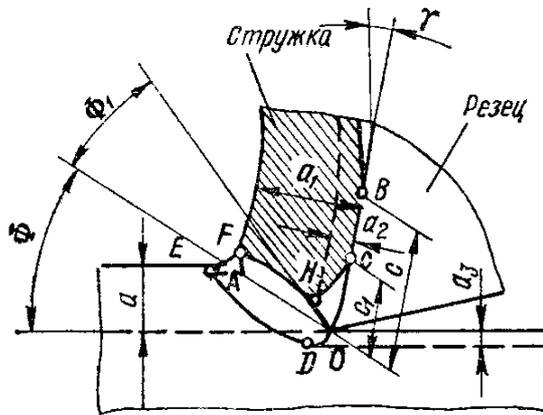


Рис. 3.1. Зона образования сливной стружки:

ODEF – зона основных сдвиговых деформаций; OHC – зона вторичных деформаций; a – толщина срезаемого слоя; a_1 – толщина стружки; a_2 – глубина контактного слоя стружки; a_3 – толщина деформированного слоя обработанной поверхности; C_1 – длина пластического контакта стружки; C – длина контакта инструмент – стружка; ϕ_1 – угол сдвига; ϕ – угол скалывания; HO – условная плоскость сдвига; C – зона упругого контакта стружки при трении о переднюю поверхность

Различают три вида стружек – сливная, скалывания и надлома (рис. 3.2).

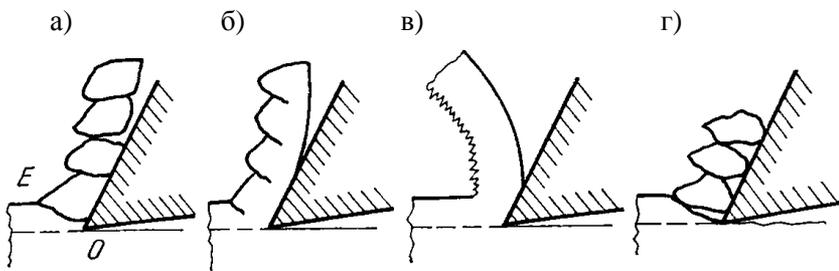


Рис. 3.2. Виды стружек:

а – элементарная; б – скалывания; в – сливная; г – надлома

Сливная стружка образуется при резании вязких и мягких материалов. Ее образованию способствует увеличение переднего угла, уменьшение толщины среза, повышение скорости резания. При сливной стружке плоскость скалывания отсутствует. Деформация слоев стружки (их сдвиг) не совпадает с плоскостью скалывания, а осуществляется в направлении плоскости сдвига под углом Φ_1 , превышающим угол Φ обычно на 30° . В направлении плоскости скалывания зерна металла имеют вытянутую форму.

Стружка скалывания образуется при резании сталей и других пластичных металлов при большой толщине среза, относительно низкой скорости резания, небольшом переднем угле. Частный случай стружки скалывания – **элементная стружка**, когда отдельные ее элементы между собой не связываются.

Стружка надлома. При больших толщинах среза и значениях переднего угла при обработке хрупких материалов происходит вырывание или откалывание крупных частиц металла неправильной формы. Отделение стружки происходит в плоскости сдвига. Образование стружек надлома можно наблюдать при обработке чугуна, однако при больших скоростях и малых глубинах резания он дает сливную стружку.

По размерам и форме стружка может быть лентообразной (прямой и путаной), винтовой длинной или короткой, плоской спиральной, элементной дробленой.

Степень дробления каждого из этих видов стружки различна и определяется объемным коэффициентом w , равным отношению объема стружки к объему сплошного металла такой же массы, как стружка. Удовлетворительной (с точки зрения отвода) формой считается винтовая длинная ($w = 50 \dots 80$), элементная дробленая ($w = 3 \dots 6$), винтовая короткая ($w = 25 \dots 45$), плоская спиральная ($w = 8 \dots 15$), неудовлетворительной – лентообразная прямая и путаная ($w \geq 90$).

При образовании лентообразной винтовой длинной и элементной дробленой стружки необходимо принимать меры для защиты от нее зоны обслуживания (особенно при токарной обработке). Отвод и транспортировка из зоны резания такой стружки затруднены; отвод спиральной плоской стружки происходит на переднюю поверхность и державку, что может повлечь за собой их поломку или повреждение. Очевидно, что формой и размерами стружки необходимо управлять. Это обеспечивается за счет естественного дробления при над-

лежащем выборе режимов резания, геометрии режущего инструмента, обрабатываемого материала (например, сталей, содержащих серу, свинец) и других условий обработки или за счет искусственного дробления с помощью экранов, кинематических способов, наложения автоколебаний, создания систем пульсирующего подвода СОЖ.

3.1.2. Наклеп металла

В процессе снятия стружки деформациям подвергается не только стружка, но и поверхностные слои основной массы металла. В поверхностном слое детали металл получает **наклеп**, который характеризуется искажением кристаллической решетки и возникновением внутренних остаточных напряжений, сильным измельчением зерен металла, появлением текстуры с преимущественной ориентировкой зерен в одном направлении.

Глубина наклепа (h_n) уменьшается при увеличении скорости резания и возрастает с увеличением угла резания и подачи. Она зависит также от вида обработки и свойств обрабатываемого материала: например, при сверлении доходит до 500 мкм, при точении – до 250 мкм, при шлифовании – до 1...3 мкм. При точении сталей глубина наклепа достигает 0,4 мм, алюминия – 2,58 мм, при обработке латуни – 0,26 мм.

3.1.3. Образование нароста

В ряде случаев на передней поверхности резца около режущей кромки налипает обрабатываемый материал, образуя **нарост**. Причины его образования – высокие удельные нагрузки на передней поверхности лезвия резца вблизи главной режущей кромки, достигающие $8,0...9,8 \cdot 10^9$ Н/м²; наличие около режущей кромки небольшой зоны нулевых скоростей.

Вследствие высоких удельных нагрузок в зоне резания образуемый нарост имеет твердость, в 2...3 раза большую твердости исходного материала. В результате сам нарост производит резание металла, являясь продолжением резца. При этом передний угол как бы увеличивается, и процесс резания облегчается. Кроме того, нарост предохраняет переднюю и заднюю поверхность от изнашивания, уменьшает тепловое воздействие на резец и таким образом увеличивает стойкость инструмента.

С другой стороны, процесс образования нароста не является стабильным явлением. Со временем нарост срывается с поверхности режущего лезвия; часть его уходит со стружкой, а часть вдавливается в обработанную поверхность, что приводит к ухудшению ее шероховатости. Резкое разрушение нароста приводит к изменению глубины резания и является причиной возникновения вибраций в технологической системе.

Величина и устойчивость нароста зависят от различных факторов. Образование нароста не происходит при очень низких и высоких скоростях резания; оно наиболее вероятно при скоростях резания от 20 до 80 м/мин. Точное положение границ нароста зависит от вида обрабатываемого материала: с увеличением пластичности его размеры возрастают; на чугунах он может вообще не образоваться. Увеличение подачи также ведет к возникновению нароста. При чистовой токарной обработке рекомендуется принимать $S = 0,1 \dots 0,2$ мм/об. При увеличении γ до 45° нарост практически не образуется.

3.1.4. Силы, возникающие при резании

Знание сил резания необходимо для расчета на прочность узлов станка, инструмента, приспособлений и для расчета на жесткость технологической системы.

На токарный резец при точении со стороны срезаемого слоя по нормали к поверхности резца и со стороны обработанной поверхности по нормали к задней поверхности резца действуют силы упругой и пластической деформации. Поскольку резец и деталь перемещаются друг относительно друга, на передней и задней поверхностях возникают силы трения (рис. 3.3).

При рассмотрении процесса резания система сил может быть приведена к одной силе, называемой *силой резания*, которая складывается из трех составляющих, расположенных в трех перпендикулярных плоскостях (рис. 3.4):

$$P = P_Z + P_Y + P_X,$$

где P_Z – главная или тангенциальная составляющая, действующая в направлении по касательной к поверхности резания – по оси Z (тангенциальная составляющая носит название *усилия резания* и определяет мощность, затрачиваемую на процесс резания; по максималь-

ной величине P_z рассчитывают на прочность узлы коробки скоростей станка и прочность резца);

P_x – осевая составляющая (*усилие подачи*), действующая в направлении оси X и определяющая силу осевой подачи (по максимальной величине P_x рассчитывают на прочность механизм продольной подачи);

P_y – радиальная составляющая (*радиальное усилие*), действующая в направлении оси Y, определяющая силу поперечной подачи и в значительной степени влияющая на вибрации и устойчивость процесса обработки (по величине P_y рассчитывают на прочность механизм поперечной подачи, а также жесткость технологической системы).

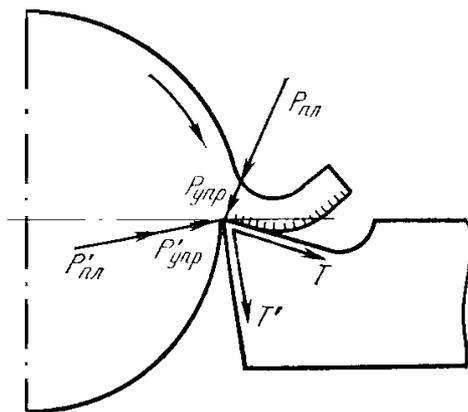


Рис. 3.3. Схема сил, действующих на резец

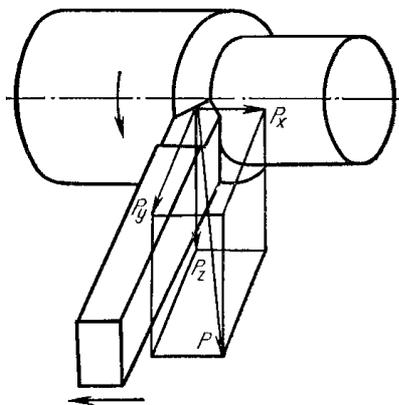


Рис. 3.4. Составляющие силы резания

Составляющие P_Y и P_X для различных видов инструмента могут быть определены в зависимости от P_Z и условий обработки. Так, при точении резцами с $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 0$, $\gamma = 15^\circ$ между этими составляющими силы резания имеется примерно следующее соотношение:

$$P_Z : P_Y : P_X = 1 : (0,55 \dots 0,4) : (0,45 \dots 0,25).$$

Приближенно

$$P = 1,1 P_Z, \quad P = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2}.$$

При затуплении резцов значения P_Y и P_Z возрастают.

Влияние отдельных параметров на силы резания различно. Например, размер угла α не оказывает существенного влияния на силы резания; при изменении угла γ сила P_Z изменяется на 1...2 % на каждый градус изменения γ . Угол φ также значительно влияет как на силу P_Z в связи с изменением формы и размеров стружки, так и на соотношение сил P_X и P_Y . Угол λ оказывает незначительное влияние, – главным образом, на составляющую P_Y .

Скорость резания для твердосплавного инструмента в диапазоне значений 80 м/мин и более оказывает значительное влияние на силы резания. При обработке деталей инструментом из быстрорежущих сталей они превышают силы резания при обработке твердосплавным инструментом; при их расчете необходимо учитывать влияние скорости резания.

Влияние отдельных параметров на силы резания при их расчете учитывается поправочными коэффициентами: k_v , k_m , k_φ , k_γ , k_λ , учитывающими влияние скорости резания, физико-механических свойств обрабатываемого материала, углов φ , γ и λ .

Общий вид формулы для расчета составляющих сил резания с учетом коэффициентов имеет вид

$$P_{Z,Y,X} = 9,81 \cdot C_p \cdot t^X \cdot s^Y \cdot v^n \cdot k_v \cdot k_m \cdot k_\varphi \cdot k_\gamma \cdot k_\lambda,$$

где C_p – постоянная, отражающая влияние других условий обработки.

3.1.5. Мощность и крутящий момент при резании

Мощность N_P (в кВт), затрачиваемая на резание со скоростью v (в м/мин) или с частотой вращения n (в об/мин), равна

$$N_P = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60},$$

где 1020 – переводной коэффициент.

Для большинства случаев формула верна, так как $P = 1,1 P_z$, а $v \gg s$.

Требуемая мощность двигателя станка определяется

$$N_{\text{эд}} \geq \frac{N_P}{\text{КПД}},$$

где КПД станка $\eta = 0,75 \dots 0,8$.

Крутящий момент резания

$$M_{\text{кр}} = \frac{P_z \cdot D}{2} \text{ (Н} \cdot \text{м)},$$

где D – диаметр обрабатываемой заготовки, мм.

3.1.6. Тепловые процессы при резании

Тепловыделение при резании связано с превращением работы сил упругопластических деформаций, трения по передним и задним поверхностям инструмента и образования новых поверхностей в тепло. В теплоту превращается до 85...90 % всей работы резания, и только 10...15 % идет на искажение кристаллической решетки обрабатываемого материала в зоне резания.

Количество тепла, выделяемого при резании в единицу времени, равно

$$Q = \frac{P_z \cdot v}{5,6}, \text{ ккал/мин.}$$

Теплота, выделяющаяся в зоне резания, оказывает влияние на величину коэффициента трения, определяющую силу трения, точность обработки, интенсивность наростообразования и износа инструмента.

Интенсивность тепловыделения в разных зонах различна. Наибольшая деформация металла наблюдается в контактном слое стружки, где степень деформации в десятки раз выше, чем в других зонах. Здесь же происходит работа трения по передней грани, чем можно объяснить наибольшее тепловыделение и температуру со стороны передней поверхности режущего клина. Наименьшие деформации металла и силы трения возникают в слоях обработанной поверхности, прилегающих к задней грани инструмента; температура нагрева в этой зоне тоже наименьшая.

Выделяющееся при резании тепло отводится со стружкой (60...70 %, при больших скоростях резания – до 90 %), через режущий инструмент (около 20 %), через обрабатываемое изделие (около 10 %), в окружающее пространство путем излучения и конвекции (около 1 %), а при подводе СОЖ – путем теплопередачи.

Устойчивый тепловой баланс при резании наблюдается при равенстве выделяющегося и отводимого тепла. Температура в зоне резания при этом определяется характеристиками обрабатываемого и инструментального материалов, режимами резания, условиями обработки.

3.1.7. Износ режущих инструментов и его основные причины

Физическая картина процесса *износа* режущего инструмента сложна в связи с тем, что рабочие поверхности инструмента испытывают на себе действие высоких температур и больших удельных сил трения. Кроме того, износ режущих инструментов происходит в условиях сухого (при отсутствии смазывающего слоя) или полусухого (при частичной смазке) трения, что способствует росту коэффициента трения.

Выделяют 4 основных вида износа: абразивный, адгезионный, диффузионный и окислительный (рис. 3.5).

Абразивный износ (2) вызван трением сходящей стружки о переднюю поверхность инструмента и задней поверхности инструмента об обрабатываемую поверхность при обработке сталей, со-

державших твердые включения (например, карбидные). При этом твердые структурные составляющие обрабатываемого материала наносят тонкие царапины на рабочие поверхности инструмента вблизи режущей кромки. Абразивный износ значительно возрастает при наличии на заготовке литейной корки или окалины.

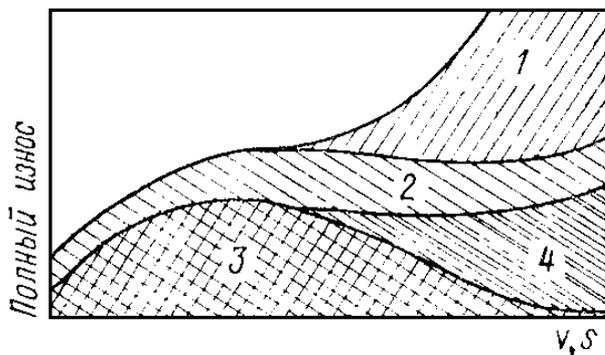


Рис. 3.5. Основные механизмы износа режущего лезвия в зависимости от скорости резания

Адгезионный износ (3) связан с процессами схватывания (сваривания) отдельных микроучастков поверхности инструмента со стружкой под воздействием высоких давлений и температуры в зоне резания при непрерывном перемещении стружки по инструменту. Возникновение зон схватывания (сварки) приводит к уносу мельчайших частиц инструментального материала со стружкой. Созданию таких зон способствует шероховатость поверхности инструмента. Адгезионный износ особенно возрастает при скоростях резания, способствующих образованию нароста.

Диффузионный износ (1), как правило, наблюдается при обработке твердосплавным инструментом труднообрабатываемых материалов и связан с взаимной диффузией отдельных элементов обрабатываемого материала и инструмента при высоких температурах и давлениях. Интенсивно протекающие в зоне резания диффузионные процессы приводят к изменению химического состава (например, обезуглероживанию) и механических свойств (уменьшению твердости) поверхностного слоя инструмента и, как следствие, снижению его износостойкости.

Окислительный износ (4) возникает у инструментов из высоко-теплостойких материалов и представляет собой «угорание» частиц режущего клина в примыкающих к контактной зоне участках. На вспомогательных режущих кромках «угорание» начинается только при температуре 700...800°С и выше (твердые сплавы), поэтому окислительный износ инструмента из инструментальных сталей можно не учитывать.

В зависимости от условий резания суммарный износ определяется комбинацией основных видов износа.

По форме износа режущего клина различают:

- 1) износ по передней поверхности;
- 2) износ по передней поверхности с образованием лунки;
- 3) износ, связанный с округлением режущей кромки;
- 4) износ по задней поверхности (рис. 3.6).

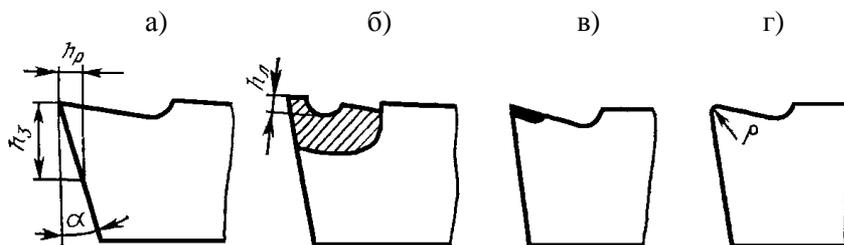


Рис. 3.6. Геометрические формы износа режущего лезвия токарного резца:

а – по задней поверхности (h_z – износ по задней поверхности; h_r – радиальный износ); б – по передней поверхности с образованием лунки (h_d – глубина лунки); в – по передней поверхности; г – с округлением режущей кромки

Износ инструмента, как правило, происходит как по передней, так и по задней поверхностям. Поэтому в зависимости от условий обработки можно говорить о преобладающей форме износа.

Преимущественный износ по передней поверхности наблюдается при обработке пластичных материалов с большим сечением срезаемого слоя. При этом на передней поверхности резца из быстрорежущих сталей образуется лунка. Эта форма износа наблюдается и при образовании нароста. При чистовой обработке материалов, обладающих низкой теплопроводностью (пластмассы), а также при обработке высокопрочных металлов (аустенитные стали) происходит износ в форме округления режущей кромки.

Износ по задней поверхности преобладает при обработке пластичных металлов с толщиной среза до 0,1 мм, при обработке хрупких металлов (чугуны, твердые бронзы), а также при работе осевым размерным инструментом (сверлами, зенкерами, развертками, фрезами и др.). Износ по задней поверхности является основной, наиболее часто встречаемой формой износа.

Износ по передней и задней поверхностям одновременно наблюдается при обработке сталей, склонных к наклепу. Он характеризуется размером лунки на передней поверхности и размером площадки износа по задней поверхности.

3.1.8. Период стойкости инструмента

Период стойкости режущего инструмента определяется временем его работы от заточки до затупления. Иногда период стойкости оценивают не временем, а длиной пути резания, числом обработанных изделий и т. д.

На операциях, обеспечивающих требуемую точность или параметры шероховатости, период стойкости определяется временем, в течение которого инструмент обеспечивает получение требуемых параметров.

В нормативах период стойкости резцов устанавливается равным 30...60 мин (наименьшее значение соответствует резцам из быстрорежущих сталей, наибольшее – из твердосплавного инструмента), фрез (цилиндрических, торцовых, дисковых) – 60...400 мин, сверл – 6...210 мин. Эти периоды стойкости соответствуют наименьшим затратам на обработку.

Период стойкости используется при разработке нормативов режимов резания, расхода инструмента, расчета экономической эффективности и т. д.

При определении времени принудительной смены инструментов на автоматизированном оборудовании (автоматических линиях, станках с ЧПУ, обрабатывающих центрах) используют установленный период стойкости, значительно меньший, чем средний (0,3...0,5 от T_{cp}), и гарантирующий безотказную работу инструмента на этот период.

Период стойкости инструментов при многоинструментальной обработке принимаем

$$T_{ми} = T \cdot K_{ми}.$$

Если число одновременно работающих инструментов: 3; 5; 8; 10; 15, то $K_{\text{ми}}$ равен: 1,7; 2; 2,5; 3; 4 соответственно.

При многостаночном обслуживании период стойкости

$$T_{\text{мо}} = T \cdot K_{\text{мо}}.$$

Если число одновременно обслуживаемых станков: 2; 3; 4; 5; 6, то коэффициент $K_{\text{мо}}$ равен: 1,4; 1,9; 2,2; 2,6; 2,8 соответственно.

3.1.9. Критерии стойкости инструмента

За *критерий износа МРИ* обычно принимают допустимую величину изношенной площадки на задней поверхности режущего лезвия инструмента (h_3). Интенсивность износа зависит от многих факторов, среди которых определяющее значение имеют выбранные режимы резания.

При обработке заготовок из сталей средней твердости экспериментально полученная зависимость износа (в мм) по задней поверхности от режимов резания имеет вид

$$h_3 = C_H \cdot V^{5,5} \cdot S^{3,1} \cdot t^{1,7},$$

где C_H – коэффициент, характеризующий условия обработки.

Из зависимости видно, что наиболее сильно влияет на износ скорость резания, менее – подача и глубина резания. Таким образом, повышать производительность обработки резанием целесообразно, в первую очередь, путем увеличения глубины резания и подачи, и, только используя эти возможности, можно повышать скорость резания.

Оптимальными значениями допустимого износа являются: для токарных твердосплавных резцов при обработке стали для чернового точения $h_3 = 1,0 \dots 1,4$ мм; для чистового – $0,4 \dots 0,6$ мм; для инструмента из минералокерамики и сверхтвердых материалов $h_3 = 0,15 \dots 0,3$ мм.

Кроме того, при чистовой обработке за критерий износа берут конструктивно-технологические требования к деталям (шероховатость обработанной поверхности, точность получения размеров, параллельность получаемых плоскостей и т.п.). В случае нарушения этих требований резец снимается для переточки независимо от величины его износа.

3.2. Конструкционные металлические материалы, обрабатываемые резанием

3.2.1. Понятие об обрабатываемости конструкционных сталей и сплавов резанием

Среди всех материалов, используемых в промышленности, в частности, в машиностроении, металлы и их сплавы являются самыми распространенными. Наибольшее применение нашли сплавы черных металлов – стали и чугуны (до 90 % производимой металлопродукции) и ряд сплавов цветных металлов на основе алюминия и меди.

Стали и сплавы, применяемые в машиностроении для изготовления деталей, несущих нагрузку, принято называть *конструкционными*.

Несмотря на то, что в современном машиностроении отчетливо проявляется тенденция к увеличению использования малоотходных методов обработки материалов (например, обработка давлением сталей и сплавов, литье и штамповка пластмассовых изделий), обработка материалов резанием остается основным методом формирования деталей. Поэтому важную роль играет такое свойство конструкционных материалов, как обрабатываемость резанием.

Под *обрабатываемостью резанием* понимают способность материала в большей или меньшей степени поддаваться обработке лезвийным инструментом.

Обрабатываемость материала резанием является интегральным показателем влияния его структуры, механических свойств и теплофизических характеристик на поведение этого материала при обработке резанием. Для различных материалов обрабатываемость различна. Рассматривая понятие обрабатываемости резанием, стоит отметить, что на качество формируемых поверхностей будет оказывать влияние также вид обработки и выбранные режимы резания.

Основными показателями, характеризующими обрабатываемость резанием, являются: стойкость режущего инструмента (T , мин); допустимая скорость резания (V , м/мин); чистота обработанной поверхности (R_a , мкм); сопротивление резанию (мощность, сила резания).

Основные факторы, влияющие на обрабатываемость сплавов резанием:

1. Химический состав обрабатываемого сплава. Увеличение количества углерода в стали повышает ее механическую прочность и

увеличивает сопротивление резанию. При содержании углерода в стали от 0,1 до 0,25 % при обработке резанием получают наибольшую шероховатость поверхности. Легирование сталей хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием, титаном, кремнием увеличивает ее прочность и уменьшает теплопроводность, что ведет к ухудшению обработки. Повышенное содержание фосфора (до 0,12 %), серы (до 0,3 %), свинца (до 0,25 %) улучшает обрабатываемость стали резанием.

2. Структура обрабатываемого сплава. Сталь с крупнозернистой структурой обрабатывается лучше, чем с мелкозернистой. Наилучшая обрабатываемость – у сталей со структурой пластинчатого перлита. Хорошую обрабатываемость имеют также стали со структурой сорбита и сорбита-феррита. Однако следует учитывать, что феррит способствует увеличению шероховатости при обработке. Особенно плохо обрабатываются стали со структурой феррита-зернистого перлита. Класс шероховатости поверхности стали со структурой зернистого перлита ниже, чем со структурой пластинчатого перлита.

3. Механические свойства обрабатываемого сплава и его способность к наклепу. Пластичные металлы и сплавы, обладающие большей склонностью к наклепу, обрабатываются труднее, чем менее пластичные. Наличие литевой корки на поверхности заготовки снижает скорость резания.

4. Физические свойства обрабатываемого сплава (теплоемкость, теплопроводность). Сплавы, обладающие большей теплопроводностью и теплоемкостью, обрабатываются лучше.

По сравнительной обрабатываемости резанием все конструкционные стали и сплавы условно делят на 4 группы:

1) легкообрабатываемые – латуни, бронзы, мягкие чугуны, автоматные стали;

2) средней обрабатываемости – углеродистые и низколегированные конструкционные стали;

3) обрабатываемости ниже средней – высоколегированные конструкционные стали мартенситного, мартенситно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов, твердые чугуны;

4) труднообрабатываемые – высоколегированные конструкционные стали аустенитного класса, сплавы на никелевой и кобальтовой основе.

В соответствии с международным стандартом ISO, обрабатываемые резанием конструкционные стали и сплавы делят на 3 основные группы: Р, М, К, каждая из которых обозначается своим цветом: синий, желтый, красный соответственно. Принадлежность стали к той или иной группе определяет выбор групп инструментальных материалов для их обработки. В группу Р включены все углеродистые и низколегированные конструкционные стали. Типовой представитель группы – низколегированная сталь с твердостью 180 НВ, – например, ШХ15, 40Х, ХВГ. В группу М входят нержавеющие и другие высоколегированные стали. Типовой представитель – аустенитная нержавеющая сталь с твердостью 180 НВ, – например, Х18Н10Т. Группу К составляют чугуны. Типовой представитель – серый чугун с твердостью 260 НВ, – например, СЧ25, СЧ40.

Сравнение по обрабатываемости проводят *по коэффициенту обрабатываемости* (K_{mv}), который учитывает изменение механических свойств обработанного материала в сравнении с принятым за эталонный. Например, при сравнении обрабатываемых низколегированных и углеродистых конструкционных сталей по твердости

$$K_{mv} = \frac{207}{HB},$$

по прочностным свойствам

$$K_{mv} = \frac{750}{\sigma_B},$$

где НВ – твердость;

σ_B – предел прочности стали на разрыв.

Если $K_{mv} > 1$, при назначении режимов резания скорость резания может быть увеличена на величину K_{mv} ; если $K_{mv} < 1$, следует уменьшить скорость резания на величину K_{mv} .

В отечественной справочной литературе по нормативам режимов резания при рассмотрении конструкционных углеродистых и подшипниковых сталей за эталон, как правило, берут сталь 45 твердостью 207 НВ или 220 НВ, при сравнении обрабатываемости нержавеющих высоколегированных сталей и сплавов – сталь 12Х18Н10Т, чугунов – серый чугун СЧ45 твердостью 190 НВ, медных и алюми-

ниевых сплавов – бронзы низкой твердости, – например, БрО8Ц4 с твердостью 80 НВ.

Величина коэффициента обрабатываемости для одних и тех же материалов сильно зависит от вида обработки и материала режущего инструмента. Влияние изменения механических свойств сталей на их обрабатываемость резанием, а значит, и на необходимость корректировки режимов резания, более сильно проявляется при обработке инструментом из быстрорежущих сталей (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1

Сравнительная обрабатываемость углеродистых и низколегированных конструкционных сталей (за эталон взята сталь 45 твердостью 207 НВ)

Твердость стали, НВ	156	187	207	229	320	375
Обработка точением твердосплавным инструментом K_{mv}	1,3	1,1	1	0,9	0,65	0,55
Обработка точением инструментом из быстрорежущей стали K_{mv}	1,55	1,15	1	0,85	0,5	0,4

3.2.2. Конструкционные стали и сплавы

Механические свойства конструкционных сталей и, следовательно, их обрабатываемость резанием зависят от их химического состава и структурного состояния.

По химическому составу можно выделить следующие группы сталей:

- 1) углеродистые конструкционные стали;
- 2) низколегированные конструкционные стали;
- 3) высоколегированные качественные конструкционные стали и сплавы.

1. Углеродистые конструкционные стали. Различают стали углеродистые общего назначения (стали обыкновенного качества) и стали углеродистые качественные.

Углеродистые стали общего назначения – самые дешевые и массовые конструкционные стали, широко применяемые для изготовления как малоответственных, так и нагруженных деталей машин и строительных конструкций. Такая сталь хорошо обрабатыва-

ется резанием, что связано с относительно низким содержанием углерода (от 0,05 % до 0,5 %) и отсутствием твердых включений.

При производстве данной стали не предъявляется особо высоких требований к составу шихты, процессу плавки и разлива. Как правило, детали из сталей обычного качества используются без термообработки. Однако с целью повышения механических свойств и экономии металла стали данной группы могут подвергаться термообработке.

Маркировка. Обозначение марки стали данной группы содержит цифры и буквы: Ст – сталь; цифры от 0 до 6 (после Ст) – условный порядковый номер марки стали в зависимости от ее химического состава и механических свойств. Увеличение номера указывает на повышение содержания углерода и прочности стали; цифры в конце марки обозначают категорию стали. 1-я категория в обозначении марки стали не указывается; буквы Б и В указывают группу стали (группа А в обозначении марки не указывается); кп – кипящая; пс – полуспокойная; сп – спокойная; Г – повышенное содержание марганца.

Пример маркировки. ВСт5Гпс2 – углеродистая сталь общего назначения группы В (поставляется по механическим свойствам и химическому составу); 5 – условный номер марки; Г – повышенное содержание марганца в стали; пс – степень раскисления в стали (полуспокойная); 2 – категория стали.

Назначение сталей обычного качества весьма разнообразно: например, стали Ст0, БСт0, Ст2кп, БСт2кп, ВСт2кп идут на изготовление неотчетственных малонагруженных деталей и элементов строительных конструкций (ограждений, настилов и т.п.). Для средненагруженных деталей, таких как несущие элементы конструкций, фасонные профили для вагонов, ободов колес, тракторов и сельхозмашин, используются стали марок Ст3 групп А, Б, В всех степеней раскисления, ВСт4сп3. Из сталей марок Ст5пс, Ст5сп изготавливают детали, работающие в интервале температур от 0° до 425°С (например, детали котлов). Детали из стали Ст6 могут быть подвергнуты значительному упрочнению термообработкой. Из этой стали (Ст6сп и Ст6пс) изготавливают бабы молотов, валы, оси, шпиндели, ломы.

Качественные углеродистые стали отличаются от сталей обычного качества более высокими механическими свойствами, достигаемыми за счет уменьшения содержания в стали серы,

фосфора и неметаллических включений. С увеличением содержания в данных сталях углерода их твердость повышается (от 100...130 НВ – для сталей 08 и 10 до 200 НВ – для стали 60), что приводит к уменьшению обрабатываемости сталей лезвийным инструментом. Так, коэффициент обрабатываемости стали 08 твердосплавным инструментом $K_{mv} = 2,1$, стали 60 – $K_{mv} = 0,6$ (за единицу принято значение K_{mv} для стали 45).

Маркировка. Цифры указывают массовую долю углерода в стали в сотых долях процента; буквенные обозначения соответствуют сокращениям, принятым в маркировке углеродистых сталей общего назначения.

Пример маркировки. Сталь 45 – углеродистая качественная конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,45 %, спокойная.

Из низкоуглеродистых высококачественных сталей (марок 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25) изготавливают малонагруженные детали машин, термически не обрабатываемые (шайбы, болты, прокладки, змеевики, муфты, трубы маслоотделительных систем, шпильки и т.п.) или подвергаемые химико-термической обработке (цементируемые и цианируемые детали с высокой поверхностной твердостью и низкой прочностью сердцевины – втулки, вкладыши, малонагруженные зубчатые колеса, звездочки, валики масляных насосов, детали сельскохозяйственного, автотракторного и общего машиностроения).

Среднеуглеродистые стали (марки 30...55) применяются для изготовления разнообразных деталей во всех отраслях машиностроения – зубчатых колес, коленчатых и распределительных валов, крепежных деталей, ходовых винтов металлорежущих станков. Для повышения прочностных и эксплуатационных свойств деталей машин из стали этой группы широко используются различные виды термической обработки.

Стали высокой прочности (с содержанием углерода от 0,6 до 0,85 %, – например, сталь 60) используются для изготовления прокатных валков, пружинных колец, дисков сцепления и др. деталей.

2. Низколегированные конструкционные стали. Стали данного класса содержат, как правило, до 0,2 % углерода и 3...5 % легирующих элементов. Они подвергаются обязательной термообработке, обладают разнообразием свойств и областей применения. Ис-

пользование высокопрочных низколегированных сталей взамен углеродистых позволяет снизить расход металла на 15...30 %. Такие стали обладают удовлетворительным сочетанием прочностных свойств и хорошей обрабатываемостью резанием. С повышением механических свойств металлов (твердости, предела прочности), достигаемых за счет легирования, возрастает сопротивление металлов обработке резанием, т.е. ухудшается их обрабатываемость. Из низколегированных сталей наилучшей обрабатываемостью резанием обладают хромистые стали. Дополнительные легирующие элементы ухудшают ее обрабатываемость. Особенно отрицательно влияет на обрабатываемость стали кремний и марганец. В сравнении со сталью 45 коэффициент обрабатываемости данных сталей изменяется в пределах 0,7...0,95.

Маркировка. Первые две цифры – средняя массовая доля углерода в сотых долях процента; цифры после букв – примерная массовая доля легирующего элемента в целых единицах; отсутствие цифры после буквы означает, что в марке содержится до 1,5 % данного легирующего элемента. Легирующие элементы обозначаются буквами: Х – хром; Н – никель; В – вольфрам; М – молибден; Ф – ванадий; С – кремний; Г – марганец; Ю – алюминий; Т – титан; Р – бор. Буквы в конце марки означают: А – высококачественная; Ш – особовысококачественная.

Примеры маркировки. Сталь 12Х2Н4А – легированная конструкционная высококачественная сталь со средней массовой долей углерода – 0,12%, хрома – 2%, никеля – 4%.

Легирующие элементы вводят для увеличения прочности конструкционных сталей, их прокаливаемости и закаливаемости, улучшения обрабатываемости резанием. Основными легирующими элементами являются хром, марганец, кремний и никель. В сочетании с основными легирующими элементами в составе конструкционных сталей могут использоваться дополнительные – вольфрам, молибден, ванадий, алюминий, титан, бор. Низколегированные стали делятся на группы, называемые по виду легирующего элемента, – например, хромистые (20Х, 40Х), хромоникелевые (20ХН) и т.д. Высокие механические свойства низколегированных сталей, получаемые после термообработки, позволяют использовать их для изготовления наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей, – например, изделий, работающих на износ (хромистые – 15Х, 45Х и

т.д., марганцовистые – 20Г, 40ГР и т.д. стали), – крупных зубчатых колес, валов, фрикционных дисков; тяжелонагруженных и ответственных деталей автотракторостроения, станкостроения, горнорудного машиностроения – зубчатых колес грузовых автомобилей (15ХГН2ГА), крестовин карданов (20ХГНТР), деталей буровых машин (38ХГН); деталей турбин и компрессорных машин, работающих при температурах до 450°С (стали 30ХН2МФА, 38ХН3МФА, 38Х2МЮА) и т.д.

Легирующие элементы могут не только ухудшать, но и улучшать обрабатываемость сталей. Например, добавление в сталь свинца (0,15...0,3 %), серы или кальция позволяет поднять скорость резания на 30...40 % без снижения стойкости инструмента. При сохранении обычных скоростей резания стойкость инструмента увеличивается в 2...7 раз. Указанные стали предназначены для обработки на станках-автоматах (отсюда – название стали – автоматная), а также для обработки давлением в горячем состоянии с последующей обработкой резанием. Оптимальным содержанием углерода для таких сталей считается от 0,07 до 0,4 %. Более низкая массовая доля углерода ведет к повышению вязкости, более высокая – к повышению твердости, что ухудшает обрабатываемость резанием. Коэффициент обрабатываемости автоматных сталей равен 1,1...1,2.

Маркировка. А – автоматная сернистая; АС – автоматная свинецсодержащая; цифры после букв А и АС – средняя массовая доля углерода в сотых долях процента; цифры после букв, обозначающих легирующие элементы, – примерная массовая доля данного элемента в целых единицах; отсутствие цифры после буквы означает, что в марке содержится до 1,5% данного легирующего элемента; Е указывает на наличие селена в стали.

Примеры маркировки. Сталь АС19ХГН – автоматная свинецсодержащая легированная сталь со средней массовой долей углерода 0,19%, хрома – до 1,5%, марганца – до 1,5%, никеля – до 1,5%.

3. Высоколегированные качественные конструкционные стали и сплавы. Эта группа металлических материалов обширна и разнообразна по областям применения. Сюда относят высоколегированные стали, сплавы железоникелевые и на никелевой основе. Для обработки таких материалов, как правило, используются инструменты из твердых и сверхтвердых материалов, которые могут быть подвергнуты дополнительному упрочнению рабочих поверх-

ностей в связи с тем, что контактные напряжения, действующие на переднюю и заднюю поверхности инструмента при обработке сложнолегированных сталей и сплавов, могут достигать 4000 МПа, тогда как при обработке низколегированных сталей они изменяются в пределах 700...1000 МПа.

Наихудшей обрабатываемостью в этой группе обладают стали аустенитного класса (например, хромоникелевая нержавеющая сталь 12X18Н10Т), наилучшей – имеющие структуру мартенсита (20X13, 20X17Н2, 15X5ВФ), феррита (хромистые нержавеющие стали – 12X17, 15X25Т) или пластинчатого перлита (например, 12МХ, теплоустойчивая сталь 18X3НФ). Ряд жаропрочных сталей и сплавов, особенно – сплавов на никелевой и железоникелевой основе, практически не поддаются обработке резанием. K_{mv} для таких сталей изменяется в пределах от 0,55 до 0,8.

К высоколегированным сталям относятся железоуглеродистые сплавы, содержание железа в которых составляет более 45%, а суммарное содержание легирующих элементов – не менее 10% (считая по верхнему пределу) при содержании одного из элементов не менее 8% (по нижнему пределу). К железоникелевым сплавам относятся сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в железоникелевой основе; при этом суммарная массовая доля никеля и железа составляет более 65% при приблизительном отношении никеля к железу 1 : 1,5. К сплавам на никелевой основе относятся сплавы, основная структура которых – твердый раствор хрома и других легирующих элементов в никелевой основе, при этом содержание никеля составляет не менее 55%.

Высоколегированные качественные конструкционные стали и сплавы подразделяются на следующие группы:

1) **коррозионностойкие (нержавеющие) стали и сплавы**, устойчивые против электрохимической и химической коррозии (атмосферной, почвенной, солевой, кислотной, щелочной), межкристаллитной коррозии, коррозии под напряжением и др.;

2) **жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы**, устойчивые против химического разрушения поверхности в газах при температурах выше 550°C, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;

3) **жаропрочные стали и сплавы**, способные работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью; теплоустойчивые стали, используемые в котлостроении, нефтеперерабатывающей промышленности и др.

Маркировка. Цифры перед буквенным обозначением указывают среднюю или максимальную массовую долю углерода в сотых долях процента; цифры, стоящие после букв, – среднюю массовую долю легирующего элемента в целых единицах, кроме элементов, присутствующих в малых количествах; цифры после буквы Н – среднюю массовую долю никеля в процентах (в сплавах на никелевой основе – не менее 55%, в сплавах на железоникелевой основе – не более 45%). Обозначение легирующих элементов – такое же, как для низколегированных конструкционных сталей; Д – медь; К – кобальт; Б – ниобий.

Примеры маркировки: Сталь 12Х18Н10Е – высоколегированная коррозионностойкая сталь с массовой долей углерода не более 0,12%, средней массовой долей хрома – 18%, никеля – 10%; буква Е указывает на наличие в стали селена; сплав ХН58В – коррозионно-стойкий сплав на никелевой основе, содержащий в среднем 58% никеля, легированный хромом и вольфрамом.

3.2.3. Чугуны

Чугун – это сплав железа с углеродом с содержанием углерода более 2,14 %. Применяемые в машиностроении чугуны делят на серые, высокопрочные и ковкие.

1. Серый чугун – один из наиболее распространенных литейных сплавов, самый дешевый металлический материал, имеющий отличные литейные свойства (линейная усадка – 1,0...1,3 %). Серый чугун используется, в основном, для изготовления корпусных деталей (станин станков, резервуаров для масла, блоков цилиндров и т.п.). В его структуре графит имеет форму слегка изогнутых пластинок, нарушающих целостность металлической основы и играющих роль надразов и легких трещин. Такая форма графитовых включений делает серый чугун весьма легкообрабатываемым и хрупким материалом. По сравнению со сталями при обработке серых чугунов силы резания и затраты энергии на процесс резания уменьшаются. Обрабатываемость чугунов ухудшается с ростом их твердости.

2. Высокопрочный чугун получают специальной обработкой серого чугуна. Уровень его механических свойств соответствует стали. При этом он обладает большей жидкотекучестью, чем сталь, что уменьшает долю брака получаемых отливок. Высокопрочный чугун достаточно широко используется в машиностроении как заменитель серого и ковкого чугунов, стальных отливок и поковок.

Отличительной особенностью высокопрочного чугуна является компактная шаровидная форма включений графита, которая в меньшей степени ослабляет металлическую основу. Дополнительное легирование высокопрочного чугуна кремнием, марганцем, никелем, хромом и другими элементами повышает его прочность, но уменьшает обрабатываемость резанием.

3. Ковкий чугун по своим литейным и механическим свойствам занимает промежуточное положение между серыми чугунами и сталью. Название «ковкий» является условным, так как чугун ковке не подвергается. По сравнению со сталью ковкий чугун – более дешевый, обладает лучшими литейными свойствами и более высокой обрабатываемостью резанием. По сравнению с серым ковкий чугун – более вязкий и прочный. Его недостатком является невысокий размер сечений отливки (до 50 мм). Из ковкого чугуна изготавливают те же детали, что и из серого, с сечением не более 50 мм.

Маркировка. Цифры после букв означают минимальную величину временного сопротивления при растяжении, 10^{-1} МПа; второе число – относительное удлинение, %; С – серый; В – высокопрочный; К – ковкий; Ч – чугун.

Примеры чтения маркировки. СЧ30 – серый чугун с минимальной величиной временного сопротивления при растяжении $30 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$; ВЧ100 – высокопрочный чугун с минимальной величиной временного сопротивления при растяжении $100 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$; КЧ70-2 – ковкий чугун с минимальной величиной временного сопротивления при растяжении $70 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$ и относительным удлинением 2%.

3.2.4. Сплавы на основе алюминия и меди

Данная группа сплавов достаточно хорошо обрабатывается резанием. Наиболее широкое распространение в машиностроении получили сплавы меди – латуни и бронзы, а также сплавы алюминия –

дуралюмины и силумины. Сравнительные значения коэффициента обрабатываемости (K_{MV}) данных сплавов приведены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Значения коэффициента обрабатываемости K_{MV}
точением алюминиевых и медных сплавов

Группа сплавов	Медные сплавы			Алюминиевые сплавы
	Латуни, обрабатываемые давлением (Л70)	Оловянные бронзы (БрО8Ц4)	Специальные бронзы (БрАЖН10-4-4)	Дуралюмины (Д16) и силумины (АЛ4, АЛ9)
НВ	60	80	120	50-70
K_{MV}	1,4	1,0	0,6	5,0

1. Латуни – это сплавы меди с цинком (до 50 %), которые могут легироваться небольшим количеством других компонентов – чаще всего – марганцем, никелем, кремнием, алюминием. Такие латуни называются *специальными* и носят название по легирующему элементу. Латуни имеют все положительные свойства меди (высокие электро- и теплопроводность, коррозионную стойкость и пластичность), но более дешевы, обладают более высокой прочностью, лучшими технологическими свойствами, хорошо обрабатываются резанием. Это – самые распространенные сплавы на основе меди.

По технологическим свойствам различают латуни, обрабатываемые давлением (которые идут на изготовление полуфабрикатов – труб радиаторного и холодильного оборудования, деталей морского и химического оборудования), и литейные (для фасонного литья, – идущие на изготовление ответственных деталей машин простой конфигурации, в том числе – деталей, работающих при ударных нагрузках, температурах до 300°C и т.п.).

Маркировка. В латунях, обрабатываемых давлением, первые две цифры – средняя массовая доля меди, %, последующие – средняя массовая доля других элементов, %, в том же порядке, что и буквы; остальное (до 100%) – массовая доля цинка; Л – латунь; А – алюминий, Ж – железо, Мц – марганец, Н – никель, О – олово, С – свинец, К – кремний, Мш – мышьяк.

В *литейных латунях* цифры после Ц – средняя массовая доля цинка (в %), последующие – средняя массовая доля других элементов (в %) в том же порядке, что и буквы; остальное (до 100%) – средняя массовая доля меди; другие буквенные обозначения – те же, что и для латуней, обрабатываемых давлением.

Примеры чтения маркировки. Сплав марки ЛМцА57-3-1 – латунь марганцево-алюминиевая со средней массовой долей меди – 57%, марганца – 3%, алюминия – 1%, остальное (39%) – средняя массовая доля цинка; сплав марки ЛЦ16К4 – латунь кремнистая со средней массовой долей цинка – 16%, кремния – 4%, остальное (80%) – средняя массовая доля меди.

2. Бронзы – это сплавы меди с оловом, а также все остальные сплавы меди, кроме латуней и сплавов медь-никель.

Оловянные бронзы – это сплавы меди с оловом, а также более сложные сплавы с добавками цинка, свинца и других элементов, обладающие высокими механическими свойствами и обрабатываемостью резанием, но имеющие ограниченное применение из-за дефицитности олова.

Безоловянные бронзы – это бронзы без олова в составе со специальными свойствами.

Бронзы, как и латуни, делятся на *литейные* и *обрабатываемые давлением*. По сравнению с латунями они обладают более высокими механическими и антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью, лучше обрабатываются резанием. Оловянные бронзы применяются, в основном, для изготовления зубчатых колес, втулок и прокладок. Безоловянные бронзы применяются для изготовления деталей, работающих в морской воде, скользящих контактов, деталей химического оборудования и гидравлических установок, шестерен, втулок, седел клапанов в авиапромышленности (БрА5, БрАЖ9-4 – алюминиевые бронзы, БрКН1-3 – кремниевые бронзы), пружинящих деталей ответственного назначения и неискрящих инструментов (БрБ2 – бериллиевые бронзы), деталей сварных конструкций (БрКМц3-1 – кремниевые бронзы), деталей, работающих при повышенной температуре (БрМц5 – марганцевые бронзы), электроды для сварки (БрХ1 – хромовые бронзы).

Маркировка. В обозначении оловянных и безоловянных бронз средняя массовая доля элементов сплава (в %) дается в том же порядке, что и буквы; остальное – средняя массовая доля меди; Бр –

бронза; О – олово, Ц – цинк, С – свинец, Ф – фосфор, Н – никель, А – алюминий, Б – бериллий, Т – титан, Ж – железо, Мц – марганец, Мг – магний, К – кремний, Кд – кадмий, Х – хром, Ср – серебро, Су – сурьма; буква Л в конце марки означает, что бронза – литейная.

Примеры чтения маркировки. БрАЖН10-4-4 – бронза безоловянная с массовой долей алюминия – 10%, железа – 4%, никеля – 4%; остальное (82%) – средняя массовая доля меди.

3. Дуралюмины представляют собой сплавы на основе системы Al-Cu-Mg и являются на сегодняшний день самыми распространенными деформируемыми алюминиевыми сплавами. Основные легирующие элементы – медь и магний – вводятся в сплав для его упрочнения, марганец – для повышения коррозионной стойкости сплавов.

Дуралюмины разделяют на подгруппы: классический дуралюмин Д1, с которым сравнивают другие дуралюмины; дуралюмин повышенной прочности Д16, на сегодняшний день – самый распространенный, отличающийся от классического повышенным содержанием магния; дуралюмины повышенной пластичности Д18, В65, содержащие меньшее количество легирующих элементов в сравнении с классическим.

Для повышения механических свойств дуралюмины подвергаются закалке при температуре 495...525°C с последующим естественным старением. Обрабатываемость резанием сплавов в отожженном состоянии – плохая, в закаленном и состаренном – удовлетворительная.

Дуралюмины используются, в основном, в конструкциях, соединяемых заклепками, болтами, точечной сваркой. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состояниях.

Маркировка. Цифры после буквы Д – условный номер сплава; буква Д в начале марки обозначает сплав типа дуралюмина.

Пример чтения маркировки. Сплав Д18 – дуралюмин с условным номером 18.

4. Силумины – сплавы на основе системы Al – Si – относятся к литейным сплавам, плохо обрабатываются резанием. Простые силумины, содержащие только алюминий и кремний (АЛ2), относятся к *термически неупрочняемым*. Силумины, содержащие, кроме алюминия и кремния, другие компоненты, называются *специальными*.

Основное назначение силуминов – изготовление сложных отливок деталей, работающих в слабо- и сильнонагруженном состоянии. Детали из силуминов могут длительно работать при температурах не более 150...200°С.

Маркировка. Буквы АЛ обозначают: сплав алюминиевый литейный; цифры после букв АЛ – номер сплава.

Примеры чтения маркировки. Сплав марки АЛ13 – алюминиевый литейный сплав (силумин) с порядковым номером 13.

3.3. Классификация и маркировка металлорежущих станков

Металлорежущим станком называется машина, предназначенная для придания заготовке определенной формы, размеров и класса чистоты поверхностей в соответствии с рабочим чертежом детали путем снятия стружки.

Классификация станков разработана Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков (ЭНИИМС). Согласно этой классификации, все станки делятся на **группы**, которые, в свою очередь, делятся на 10 **типов**. Типы, в свою очередь, делятся по **типоразмерам**, т.е. по наиболее характерным технологическим параметрам станка. Деление станков на типы проводится по основным признакам: виду обработки и применяемому инструменту; технологическим особенностям станка (для обдирочных работ, для чистовых работ и т.д.), степени автоматизации, компоновке станка (для электроэрозионных, ультразвуковых и других работ).

Маркировка. Обозначение модели станка состоит из трех или четырех цифр и букв. Первая цифра обозначает номер группы, вторая – тип станка, последние одна или две цифры указывают типоразмер станка. Прописные буквы после первой цифры указывают на модернизацию станка; буква в конце цифровой части означает модификацию базовой модели, класс точности станка или его технологические особенности.

По степени точности металлорежущие станки классифицируют на станки **нормальной** (обозначаются буквой «Н» в конце цифровой части марки станка), **повышенной** (П), **высокой** (В), **особо высокой** (А) **точности** и **особо точные** (прецизионные) (С).

Для обозначения моделей станков с программным управлением приняты следующие обозначения: Ц – с цикловым управлением; Ф1 – с цифровой индексацией положения и предварительным набором координат; Ф2 – с позиционной системой ЧПУ; Ф3 – с контурной системой ЧПУ.

Примеры чтения маркировок станков:

1К62 – станок, относящийся к токарной группе по классификации ЭНИИМС (1), модернизированный (К), винторезный (6 – тип станка), высота центров станка над уровнем станины – 200 мм (2 – типоразмер станка);

736 – поперечно-строгальный станок (цифры 7, 3) с максимальным ходом ползуна 600 мм (цифра 6);

16Д20П – токарно-винторезный станок (1, 6), модернизированный (Д), повышенной точности (П);

24АФ2 – координатно-расточной станок (2, 4), особо высокой точности (А), с позиционной системой ЧПУ (Ф2).

Кроме того, в зависимости от степени специализации металлорежущие станки разделяются на **универсальные** (служат для выполнения различных технологических операций при обработке деталей широкой номенклатуры; применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства), **специализированные** (используются для обработки деталей определенного наименования, но различных размеров) и **специальные** (предназначены для обработки одной определенной детали; применяются в условиях массового производства).

По массе металлорежущие станки делятся на **легкие** (до 1 т), **нормальные** (до 10 т), **крупные** (до 30 т), **тяжелые** (до 100 т) и **уникальные** (более 100 т).

Увеличение числа реализуемых станком функций ведет к их усложнению, что не всегда отражается в маркировке. Поэтому введена дополнительная система обозначений с помощью двузначных кодов. Например, в маркировке $\frac{16К20}{32,48}$ введены коды, которые оз-

начают: 32 – унифицированная модель, не входящая в гамму; 48 – станок с гидросуппортом.

Для получения на станке детали согласно чертежу металлорежущие станки имеют механизмы, позволяющие осуществлять заданную траекторию движения инструмента относительно заготовки в соответствии со схемой обработки.

Максимальное пространство, внутри которого возможно осуществить обработку заготовки на данном станке, называется **рабочим пространством станка**.

Качество металлорежущих станков характеризуется рядом показателей: точностью, производительностью, прочностью узлов, диапазоном регулирования скоростей исполнительных органов станка.

Точностью станка называется степень приближения действительных значений параметров станка и обработанных на нем деталей к заданным величинам. Точность оценивается погрешностью, которая равна разности между действительным и заданным значениями параметров. Различают геометрическую и кинематическую точность станка.

Геометрическая точность характеризуется прямолинейностью перемещения узлов, параллельностью прямолинейных перемещений, перпендикулярностью осей, соосностью, радиальным или осевым биением и др.

Кинематическая точность характеризуется согласованностью относительных перемещений узлов станка, на которых находятся заготовка и инструмент, и точностью деления.

Параметры точности станков, условия проведения проверок, методы измерений и нормы регламентируются государственными стандартами.

В результате изнашивания и коробления ответственных деталей точность станков со временем снижается. Высокая начальная точность обеспечивается применением узлов, элементы которых изготовлены с высокой точностью, балансировкой в собранном виде, точной установкой и регулировкой деталей. Длительное сохранение первоначальной точности в условиях эксплуатации обеспечивается профилактическими мероприятиями, предусмотренными системой планово-предупредительных ремонтов.

Производительность станка определяется количеством деталей, выпускаемых в единицу времени. Для обеспечения высокой производительности обработки конструкции современных станков, как правило, предусматривают возможность реализации силового (с большим поперечным сечением среза) и скоростного (с увеличенной скоростью резания) течения.

Важным фактором является уменьшение времени, затрачиваемого на различные вспомогательные действия рабочего, связанные с

основной работой (установку и снятие детали, управление станком, контроль получаемых размеров). Для уменьшения таких затрат времени на современных станках применяются различные автоматизирующие устройства и специальные станочные приспособления.

Большое количество деталей привода и исполнительных механизмов станка испытывают напряжения под действием переменных нагрузок. Многократное изменение напряжений может вызвать в материале **усталостные разрушения**, наиболее характерные для станков с неравномерным или прерывистым резанием, где наблюдается повышенная динамическая нагрузка узлов (например, фрезерных и долбежных станков). Наиболее часто выходят из строя из-за усталостных разрушений зубчатые колеса, валы, подшипники качения.

Прочность деталей станков, находящихся под действием постоянных или медленно меняющихся нагрузок, называется *статической*. Примерами таких деталей являются кронштейны, медленно вращающиеся валы и зубчатые колеса, неотъемлемые корпусные детали.

Диапазоном регулирования скоростей рабочих органов станка называется отношение максимальной скорости исполнительного органа к минимальной. Величина отношения максимальной частоты вращения шпинделя (n_{\max}) токарного станка к минимальной (n_{\min}) может служить показателем его степени универсальности (D):

$$D = n_{\max} / n_{\min} .$$

Чем выше D , тем более универсальным считается станок.

3.4. Обработка точением

3.4.1. Основные положения

Точение – это технологический способ обработки резанием внутренних и наружных цилиндрических, конических, фасонных, сферических и винтовых поверхностей, а также плоских торцовых поверхностей тел вращения.

Главным движением при точении является вращательное движение заготовки, движением подачи – поступательное движение инструмента. Точение ведется токарными резцами на металлорежущих

станках (универсальных и специальных), в том числе с ЧПУ, а также на карусельных и револьверных станках, токарных полуавтоматах, автоматах и автоматических линиях. Различают черновое (предварительное) и чистовое (окончательное) точение в зависимости от места операции в технологическом процессе. Точность обработки и величина шероховатости обработанной поверхности соответствуют 12...14-му квалитетам и $Ra = 25...50$ мкм при черновом точении и 9...10-му квалитетам и $Ra = 2,5...12,5$ мкм – при чистовом. **Растачивание** отверстий токарными резцами обеспечивает 11...13-й квалитет и $Ra = 12,5...25$ мкм (при черновой обработке) и 8...10-й квалитет и $Ra = 2,5...6,3$ мкм (при чистовой обработке).

3.4.2. Классификация резцов

Применяемые в машиностроении **резцы** можно классифицировать по следующим признакам:

1) **по виду станков** (рис. 3.7): токарные, строгальные, долбежные, автоматнo-револьверные, расточные (для горизонтально-расточных станков), специальные;

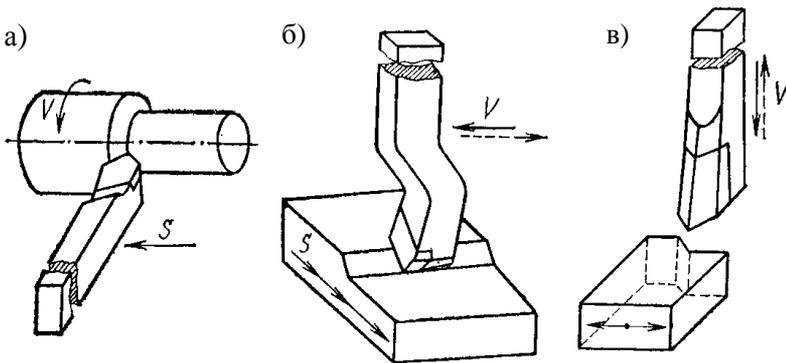


Рис. 3.7. Классификация резцов по виду станков:
а – токарные; б – строгальные; в – долбежные

2) **по виду обработки** (рис. 3.8): проходные, подрезные, отрезные, прорезные, расточные, галтельные, резьбовые, фасонные;

3) **по характеру обработки**: обдирочные (черновые), чистовые, для тонкого точения;

4) по сечению крепежной части: прямоугольные, квадратные, круглые;

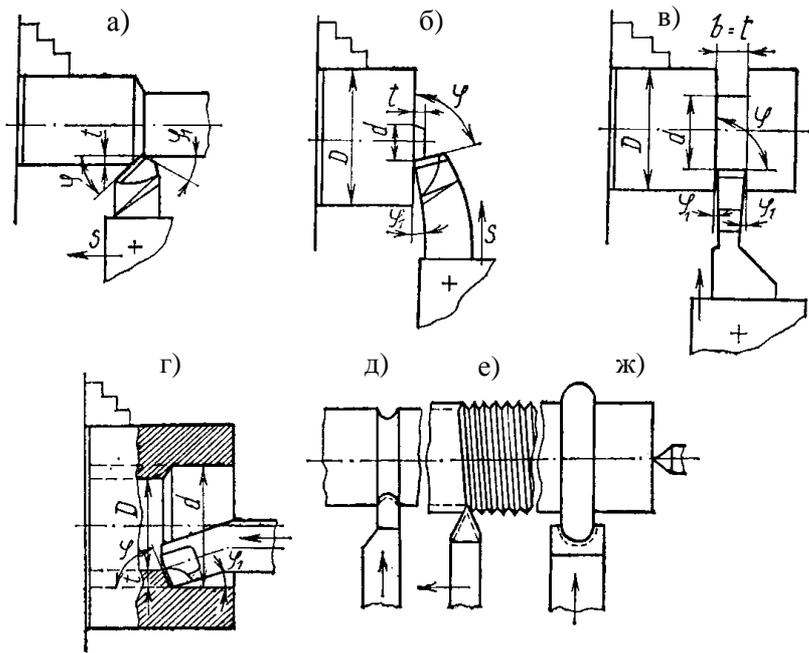


Рис. 3.8. Классификация резцов по виду обработки:
 а – проходной; б – подрезной; в – отрезной, прорезной; г – расточной;
 д – галтельный; е – резьбовой; ж – фасонный

5) по **конструкции рабочей части**: прямые, отогнутые, изогнутые, с оттянутой головкой (рис. 3.9);

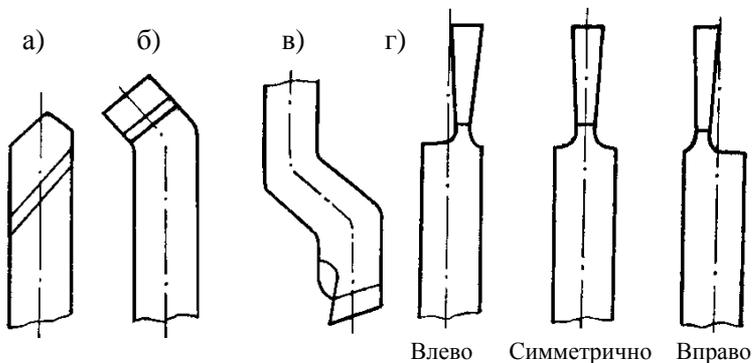


Рис. 3.9. Классификация токарных резцов по конструкции рабочей части

б) *по направлению подачи*: правые и левые (рис. 3.10);

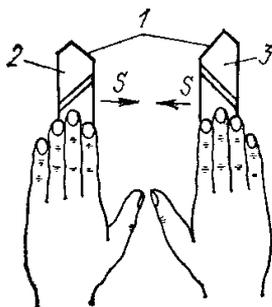


Рис. 3.10. Определение резцов по направлению подачи:
1 – главные режущие кромки; 2 – левый резец; 3 – правый резец

7) *по способу изготовления*: с рабочей частью, выполненной как одно целое с крепежной; с рабочей частью, приваренной встык; с наплавленной, напайной, клееной пластинкой; с механическим креплением пластинок или вставок;

8) *по роду инструментального материала*: из сверхтвердых материалов, с пластинками из твердого сплава, минералокерамическими пластинками, из быстрорежущей, легированной, углеродистой стали.

Наружные цилиндрические и конические поверхности обрабатывают проходными резцами; внутренние цилиндрические и конические поверхности растачивают расточными резцами; торцовые плоскости обтачивают подрезными резцами; наружные и внутренние резьбы нарезают резьбовыми резцами; разрезку заготовок на части производят отрезными резцами.

Правые резцы работают с движением подачи, направленным справа налево, т.е. к шпинделю станка, и, наоборот, **левые резцы** имеют направление движения подачи слева направо – от шпинделя станка. Для идентификации резцов пользуются правилом правой и левой руки, накладывая сверху на резец соответствующую руку так, чтобы в направлении подачи был направлен большой палец (рис. 3.10).

У **прямых резцов** рабочая часть является продолжением корпусной части без искривления их общей оси. Если геометрические оси корпуса и рабочей части пересекаются под углом (чаще всего равным 45°), эти резцы называются **отогнутыми**. Прямые и отогнутые резцы бывают как правыми, так и левыми.

Выбирая резец для выполнения конкретной операции, в технологической документации ему дают название согласно рассмотренным выше классификационным признакам.

3.4.3. Выбор рабочей части резцов

В настоящее время рабочая часть более 80 % токарных резцов выполняется из твердых сплавов. Используемые для этой цели пластины из твердых инструментальных сплавов выпускаются двух типов. Пластины 1-го типа предназначены для оснащения резцов, которые после достижения установленного износа подвергаются переточке, пластины 2-го типа – в виде многогранных неперетачиваемых пластин. Выбор марки инструментального материала режущей части токарных резцов зависит от вида обрабатываемого металла, специфики технологической операции, требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности по точности ее исполнения и качеству (шероховатости и состоянию поверхностного слоя).

Обточку *сталей* ведут резцами, оснащенными твердосплавными пластинами марок Т5К10 и Т15К6. Например, пластины из сплава Т5К10 предназначены для предварительной обточки заготовок, когда обработку ведут с повышенными глубинами резания и подачами ($t > 5$ мм; $S > 0,3$ мм/об). Эффективную обработку *чугунов* проводят резцами, оснащенными пластинами твердых сплавов марок ВК8, ВК6 и ВК6М. Сплав марки ВК8 обладает наиболее высокой прочностью и относительно низкими тепло- и износостойкостью. Пластинами из этого сплава оснащают токарные резцы, предназначенные для черновой обработки чугунных заготовок с глубинами резания $t > 4$ мм, подачами $S > 0,3$ мм/об и скоростями резания до 60 м/мин. Твердые сплавы ВК6 и ВК6М обладают меньшей прочностью, но, вместе с тем, более высокой тепло- и износостойкостью. Пластинами твердых сплавов этих марок оснащают токарные резцы, предназначенные для получистовой и чистовой обточки чугунных заготовок.

Чистовую обточку *сталей* и *чугунов* можно вести резцами с твердосплавными пластинками соответственно марок Т15К6 и ВК6, а также резцами, оснащенными пластинками, изготовленными из минералокерамики или керметов. Обработка ведется с глубинами резания $t \leq 1$ мм, подачами $S \leq 0,1$ мм/об, скоростями резания V до 300 м/мин – по стали и до 600 м/мин – по чугуну.

Окончательная обточка стальных и чугуновых заготовок ведется резцами, оснащенными поликристаллическими вставками из эльбора, при глубине резания $t \leq 0,1$ мм, подаче $S \leq 0,02$ мм/об и скоростях резания до 1000 м/мин. При окончательной обточке заготовок из *алюминиевых сплавов* используются токарные резцы со вставками из поликристаллических синтетических алмазов. Высококачественные поверхности заготовок из алюминиевых сплавов могут быть отточены с глубинами резания менее 0,1 мм и подачами до 0,1 мм/об при скоростях резания $V \geq 1000$ м/мин.

Твердосплавные пластинки прикрепляют к корпусам резцов, изготовленных из стали 45 или 40Х, пайкой с помощью припоев из *латуни* (температура пайки 780...800°C) или *красной меди* (1080...1100°C). Резцы с припаянными пластинками твердого сплава, в основном, применяют для обработки заготовок с большими подачами, когда на лезвиях резца действуют большие силы резания. Для работы на средних и облегченных режимах резания применяют токарные резцы с механическими креплениями пластин к корпусам резцов (рис. 3.11), надежно удерживающими пластины в специальных гнездах, не вызывая опасных для хрупкого твердого сплава внутренних напряжений. Для различных условий обработки разработано большое количество вариантов конструкций, обеспечивающих механическое крепление твердосплавных пластинок.

Режущая часть резцов может иметь различные по значению геометрические параметры.

Главный угол в плане ϕ на проходных токарных резцах общего назначения затачивают равным 45°. С целью повышения жесткости резца его можно заточить под углом 60°. Поворотом на угол 15° по часовой стрелке такой резец может быть установлен на суппорте станка с установочным углом $\phi_y = 45^\circ$. На проходных токарных резцах подрезного типа главный угол в плане затачивается под углом 90°. Заточка резцов с главным углом в плане $\phi < 45^\circ$ практически не применяется, поскольку это приводит к появлению вибраций.

Вспомогательный угол в плане ϕ_1 на проходных токарных резцах составляет 7...10°.

Закругление вершины резца в месте сопряжения главного и вспомогательного лезвий обязательно. Радиус закругления вершины токарных резцов рекомендуется брать в пределах 0,2...1 мм. Чем больше этот радиус, тем выше стойкость резцов и меньше шерохо-

ватость обработанных поверхностей. Вместе с тем, чрезмерное увеличение радиуса закругления ($r > 1$ мм) при малой глубине резания уменьшает фактическое значение главного угла в плане.

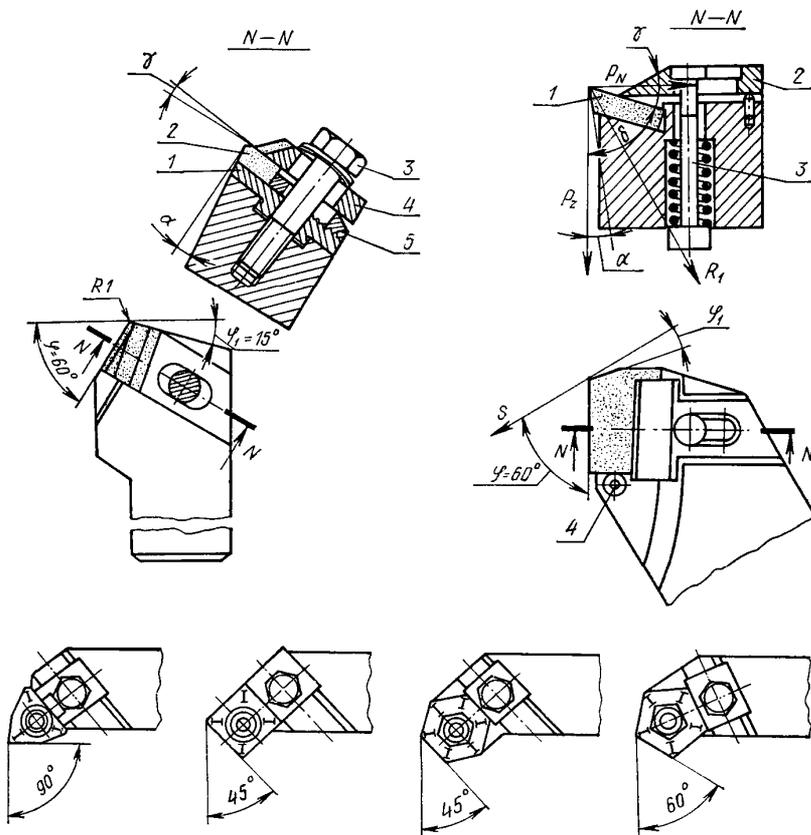


Рис. 3.11. Резцы с механическим креплением твердосплавных пластин:

слева: 1 – твердосплавная пластина; 2 – стальная закаленная подкладка; 3 – винт;
4 – прихват; 5 – клин с рифлениями; справа: 1 – твердосплавная пластина;
2 – прихват; 3, 4 – штифты

Угол наклона главной режущей кромки у проходных токарных резцов следует брать в пределах $\lambda = \pm 3^\circ$.

Главный задний угол α влияет на линейный износ задней поверхности. Чтобы уменьшить износ, необходимо увеличить задний угол; однако при этом уменьшается угол заострения β клина, обра-

зующего лезвие, снижается механическая прочность лезвия, возрастает угроза его скалывания, перегрева и разрушения действующими силами резания.

Среднее значение задних углов проходных токарных резцов, предназначенных для резания металлов с подачами $S \leq 0,25$ мм/об: $\alpha = 12^\circ$. Увеличение подачи до значений $S > 0,25$ мм/об позволяет уменьшить среднее значение заднего угла до 8° .

На перетачиваемых резцах с припаянными пластинками твердого сплава рекомендуется затачивать три задних поверхности (рис. 3.12). Рабочий задний угол α затачивают алмазным кругом вдоль лезвия на ширине 1...2 мм. Чтобы облегчить последующие переточки, остальную поверхность твердосплавной пластинки также затачивают алмазным кругом, но под углом $\alpha + 5^\circ$. Корпус резца, выполненный из стали, чтобы сократить его соприкосновение с алмазным кругом при переточках, затачивают электрокорундовым шлифовальным кругом под углом $\alpha + 8^\circ$.

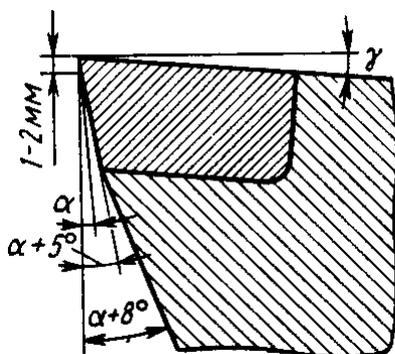


Рис. 3.12. Заточка резца по задней поверхности

Передний угол γ перетачиваемых проходных резцов, предназначенных для резания с подачами менее 0,15 мм/об, затачивают равным 15° . Передняя поверхность при этом может быть оформлена в виде плоскости (рис. 3.13 а). У резцов, предназначенных для резания металлов с подачами $S > 0,15$ мм/об, переднюю плоскость также затачивают под углом $\gamma = 15^\circ$, но вдоль лезвия под углом $\gamma_{\text{ф}} = 0$ выполняют фаску шириной 0,5...1 мм (рис. 3.13 б). С увеличением подачи S увеличивается динамическая нагрузка на лезвие резца. Чтобы укрепить

пить лезвие при работе с подачами более 0,25 мм/об, вдоль лезвия затачивается фаска f шириной 1 мм под углом $\gamma_{\phi} = -5^{\circ}$ (рис. 3.13 в).

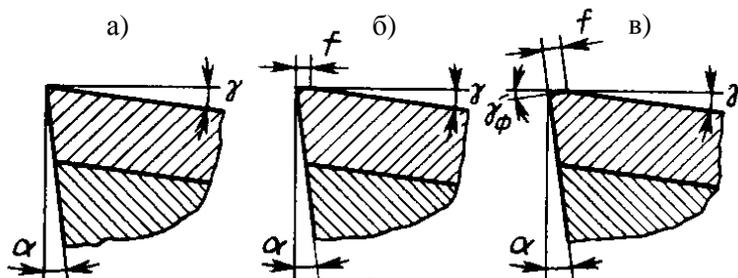


Рис. 3.13. Формы заточки резца по передней поверхности

Геометрические параметры режущей части резцов с неперетачиваемыми твердосплавными пластинками задаются формой и размерами пластинки, установленной и закрепленной на корпусе резца, и определяются их конструктивным исполнением. Прходные токарные резцы оснащаются неперетачиваемыми твердосплавными пластинками трех-, четырех- и пятигранной формы. Все типоразмеры пластинок имеют закругленные вершины.

Значения *главного и вспомогательного углов в плане* на резцах с неперетачиваемыми многогранными пластинками взаимосвязаны и определяются числом граней пластинки и ее пространственным положением на корпусе резца при закреплении. Необходимость обеспечения жесткости сборных токарных резцов не позволяет использовать конструкции с плавно регулируемым значением главного угла в плане; на практике реализуется лишь несколько значений угла ϕ , – в частности, 45, 60, 75 и 90°. Все остальные углы обеспечиваются соответствующим конструктивным исполнением корпуса резца, а именно, расположением подкладной опорной пластины корпуса.

3.4.4. Разновидности токарной обработки

Кроме обтачивания наружных поверхностей тел вращения проходными резцами, разновидностями обработки на токарных станках являются: расточка отверстий расточными резцами, отрезка отрезными резцами, обточка торцовых плоскостей проходными резцами, подрезка торцовых плоскостей подрезными резцами.

Расточка отверстий расточными резцами – это токарная обработка расточным резцом внутренних цилиндрических поверхностей заготовки (рис. 3.14). Расточку проводят по той же принципиальной кинематической схеме, что и наружную обточку. При этом вращательное движение является главным, окружная скорость обработанной поверхности заготовки – скоростью резания, прямолинейное поступательное движение вдоль оси обрабатываемого отверстия – движением подачи.

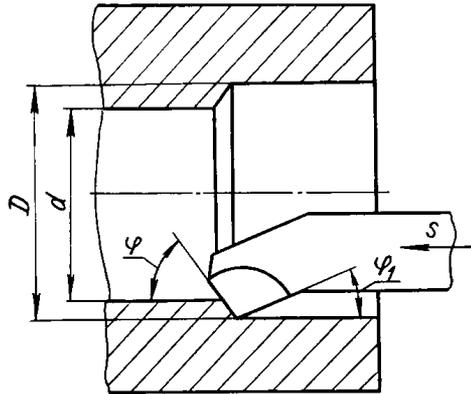


Рис. 3.14. Схема резания при растачивании

Для **наружного точения и растачивания** идентичны:

- 1) определения всех геометрических параметров режущей части;
- 2) условия процесса формирования срезаемой стружки и образования новых поверхностей на заготовке и стружке;
- 3) параметры и факторы, регламентирующие режимы резания.

Особенностью внутренней расточки являются:

- 1) ограниченный обзор (или его отсутствие при расточке глубоких отверстий) зоны резания;
- 2) малая жесткость расточного резца (особенно резцов для растачивания глубоких отверстий, которые имеют отогнутую режущую часть, расположенную на длинной консольной державке круглого сечения).

Это приводит к упругим деформациям державки и возникновению вибрации в технологической системе. Изгиб резца и появление вибраций при расточке являются факторами, накладывающими при выполнении этой операции ограничения на выбор режимов резания.

При *отрезке отрезными резцами* в заготовке вытачивают узкий паз вплоть до оси ее вращения с целью разделения заготовки на две части. Отрезку производят отрезными резцами при сочетании двух одновременно действующих движений (рис. 3.15); вращательное движение вокруг оси заготовки является главным, прямолинейное поступательное движение резца в направлении, перпендикулярном оси вращения заготовки, – движением подачи.

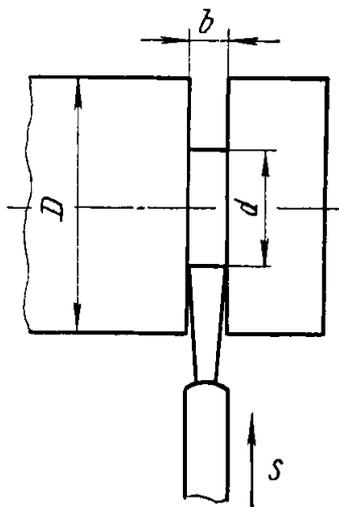


Рис. 3.15. Схема резания при отрезании

По мере врезания резца в металл заготовки уменьшается скорость резания, выражаемая в м/мин. Расчет этой скорости при отрезке ведется по диаметру наружной поверхности заготовки.

Рабочая часть отрезного резца представляет собой пластину, толщина которой меньше прорезаемого паза. Вытянутая тонкая рабочая часть отрезного резца имеет сравнительно малую прочность, что приводит к ограничению значений поперечных рабочих подач. В зависимости от ширины b вытачиваемого паза и длины рабочей части $l > 0,5D$ значения поперечной подачи для отрезных операций изменяются в пределах $0,1 \dots 0,5$ мм/об.

Геометрические параметры режущей части отрезного резца следующие: *главный угол в плане* $\varphi = 90^\circ$; *угол наклона главной режущей кромки* γ отрезных резцов обычно равен нулю (в этом случае сре-

занная стружка свертывается в плоскую спираль, свободно размещается в вытаскиваемом пазу и не мешает дальнейшему процессу резания).

Отрезные резцы имеют *два вспомогательных угла в плане* φ_1 и соответственно две вспомогательные режущие кромки. Для сохранения прочности рабочей части отрезного резца значения вспомогательных углов в плане не должны превышать $2...3^\circ$. **Вспомогательные задние углы** α_1 обычно равны 2° . **Передний и главный задний углы** у отрезных резцов изменяются по мере продвижения резца к центру вращения заготовки.

При **обработке торцовых плоскостей** точение удобно выполнять проходными токарными резцами; могут быть использованы и проходные отогнутые резцы. Торцовая обточка может вестись при перемещении резца от периферии к центру вращения заготовки или наоборот (рис. 3.16).

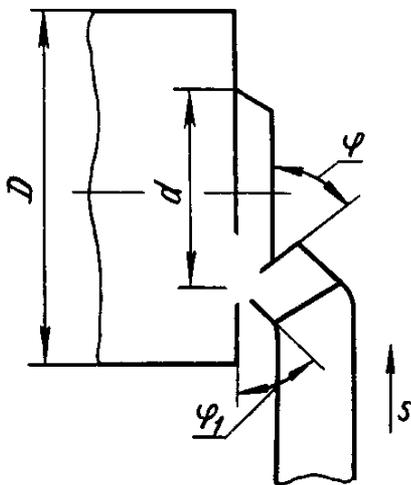


Рис. 3.16. Схема резания при подрезании торцов

При обточке ступенчатых заготовок возникает необходимость точно обрабатывать торцовые переходные плоскости между цилиндрическими поверхностями. Эта работа может быть выполнена проходными резцами подрезного типа или подрезными резцами. Геометрические оси державок при этом расположены перпендикулярно оси вращения заготовки. Как и при точении свободных торцов, здесь могут быть использованы два варианта с различными на-

правлениями движения резца: от периферии к оси вращения заготовки и, наоборот, от оси вращения заготовки к периферии. От этого зависит положение главного и вспомогательного режущего лезвий и углов в плане φ и φ_1 . Чтобы не повредить ранее обработанную цилиндрическую поверхность меньшего диаметра ступенчатого перехода, режущее лезвие, обращенное к этой поверхности (главное или вспомогательное), должно быть развернуто на угол 5° , что влияет на значение углов в плане при установке резца.

При **строгании и долблении** заготовок резцами обрабатывают плоскости или линейчатые поверхности профильного сечения с прямолинейными образующими. При строгании главное движение осуществляется в горизонтальной плоскости, при долблении – в вертикальной.

Главным движением резания является возвратно-поступательное движение резца (при поперечном строгании и долблении) или заготовки (при продольном строгании). Движением подачи является периодическое перемещение заготовки (при поперечном строгании и долблении) или резца (при продольном строгании) в направлении, перпендикулярном направлению скорости главного движения резания.

Полный цикл работы при строгании и долблении состоит из равных по длине рабочего и холостого ходов. Последовательное чередование главного движения резания со скоростью V и вспомогательного движения с подачей S составляет специфику строгания и долбления.

Поперечное строгание применяют для обработки небольших деталей. Наибольший ход ползуна у большинства станков этого типа равен 400...700 мм.

Продольное строгание применяют для обработки горизонтальных, вертикальных и наклонных поверхностей крупных деталей или для одновременной обработки нескольких последовательно закрепленных мелких деталей. Длина обрабатываемой поверхности на станках этого типа составляет 1,5...15 м.

Долбление обычно используется при необходимости обработки окон и различных пазов в отверстиях. Благодаря наличию подачи трех направлений (продольной, поперечной и круговой), которые обычно совершает заготовка, закрепленная на столе долбежного станка, долблением можно обрабатывать сложные контуры, состоящие из отрезков прямых линий и дуг.

Операции точения с точки зрения стружкообразования имеют общие черты с операциями строгания и долбления. В них используют инструмент сходной формы и с одинаковой геометрией режущей части. Если развернуть резец относительно оси против хода часовой стрелки на 90° и увеличить радиус заготовки до бесконечности, это будет схема строгания (рис. 3.17 б). Повернув вновь резец против хода часовой стрелки на 90° , переходим к схеме долбления (рис. 3.17 в). Геометрия рабочей части долбежного и строгального резцов идентична геометрии рабочей части токарного резца. Все определения геометрических и режущих параметров, расчетные уравнения силы и скорости резания, выведенные для точения, справедливы также для строгания и долбления.

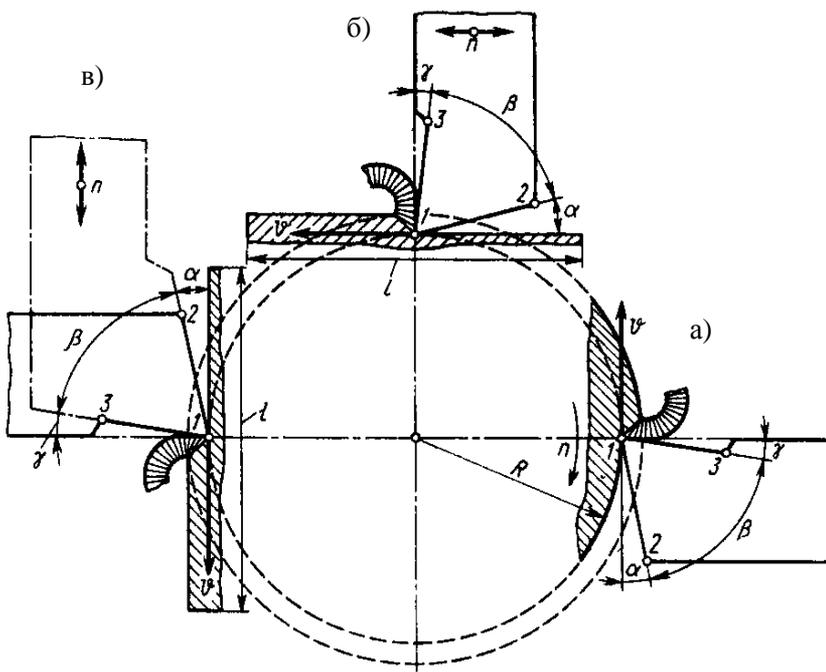


Рис. 3.17. Сопоставление схем резания при точении (а), строгании (б) и долблении (в)

Особенностями строгания является то, что при совершении одного двойного хода в начале и конце контактирования с обрабаты-

ваемой заготовкой режущие лезвия строгальных и долбежных резцов подвергаются мгновенному действию силовой нагрузки и разгрузки. В результате такого динамического воздействия более интенсивно изнашиваются контактные площадки лезвия, наблюдаются частые скалывания лезвий резцов, при обработке хрупких материалов при выходе резцов происходит отламывание краев заготовки вблизи поверхности резания. Предотвратить или ослабить нежелательные последствия можно, назначая подачу на 10...20 % меньше, чем это рекомендуется при тех же условиях для точения.

Скорость резания при строгании и долблении, как правило, изменяется по синусоидальному закону (рис. 3.18).

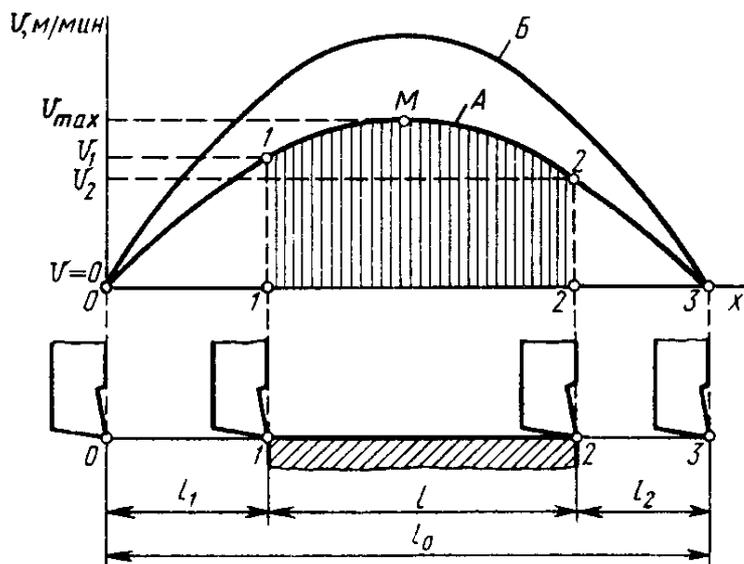


Рис. 3.18. Изменение скорости резания при строгании

При движении резца или заготовки на пути начального перебега l_1 скорость относительного перемещения возрастает от нуля в точке 0 до V_1 в точке 1. Здесь лезвие резца вступает в контакт с заготовкой. При дальнейшем движении резца от точки 1 до точки 2 происходит срезание стружки с обрабатываемой поверхности заготовки, причем скорость резания сначала возрастает, достигая в точке М максимального значения, а затем уменьшается, и при выходе резца

из контакта с заготовкой равна некоторому значению V_2 . Далее на пути длиной l_2 выходного перебега скорость движения резца уменьшается до нуля в точке 3. Обратный ход совершается со скоростью, на 15...20% большей, чем скорость рабочего хода.

К достоинствам строгания и долбления следует отнести их универсальность, низкую стоимость и простоту режущего инструмента. Обработка строганием и долблением позволяет достичь точности обработки 11...13-го качества и шероховатости обработанной поверхности 3,2...12,5 мкм при черновом строгании и 9...11-го качества и величины шероховатости обработанной поверхности 2,5...6,3 мкм при чистовом строгании. При этом резец при строгании (в отличие от точения) находится под действием факторов резания только во время рабочего хода, а во время холостого хода не работает и охлаждается. Присущее строганию и долблению возвратно-поступательное движение с холостым ходом снижает производительность процесса обработки.

3.4.5. Назначение режимов резания при точении

При выборе и назначении рабочих режимов резания при точении необходимо учитывать его характерную особенность, заключающуюся в том, что режущий инструмент имеет всего лишь одно *главное лезвие*, причем активная длина этого лезвия ограничена шириной b срезаемого слоя. На протяжении всего периода стойкости единственное лезвие резца режет металл, находясь в состоянии большой динамической и температурной напряженности. Как правило, при точении глубина резания t больше подачи. В этом случае толщина a и ширина b срезаемого слоя рассчитываются по ранее приведенным формулам. Численные значения режимных параметров зависят от назначения технологической операции.

Глубина резания при черновом точении и отсутствии ограничений по мощности оборудования и жесткости технологической системы принимается равной припуску на обработку. При чистовом точении она определяется получением требуемой шероховатости обработанной поверхности и, как правило, не превышает 2 мм.

Подача при черновом точении принимается максимально допустимой по мощности оборудования, жесткости технологической системы, прочности резца. Она составляет: при наружном точении –

0,3...2,0 мм/об – для сталей, 0,4...2,4 мм/об – для чугунов и медных сплавов; при растачивании – 0,08...1,3 мм/об и от 0,12...1,6 мм/об соответственно. Рост глубины резания при черновом точении сопровождается уменьшением скорости подачи, что связано с прочностью резца и механизмов станка.

Подачи при чистовом точении выбираются в зависимости от требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине резца в пределах 0,07...1,14 мм/об; при обработке торцов и отрезании – 0,06...0,16 мм/об – для сталей и 0,1...0,24 мм/об – для чугунов и цветных металлов.

Скорость резания при точении наружных поверхностей и растачивании определяется по эмпирической формуле

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot f^x \cdot S^y} \cdot K_v ;$$

при отрезании, прорезании канавок и фасонном тчении

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v .$$

Среднее значение периода стойкости инструмента (Т) при одноинструментальной обработке принимается равным 30...60 мин. Значения коэффициентов и показателей степеней берутся из справочников.

При всех видах строгания глубину резания и подачу назначают так же, как при точении. Скорость резания рассчитывается по соответствующим формулам для точения с введением поправочного коэффициента (K_{vy}), учитывающего ударное нагружение резца в начальный момент процесса резания. При продольном строгании $K_{vy} = 1,0$, поперечном – 0,8, долблении – 0,6.

Основное технологическое время T_0 , мин, при строгании и долблении рассчитывают как время, затраченное на обработку поверхности одной заготовки шириной В и длиной l :

$$T_0 = \frac{i \cdot (l_1 + l + l_2) \cdot (\Delta B_1 + B + \Delta B_2)}{V \cdot S} ,$$

где l_1 и ΔB_1 – начальные перебеги на каждый двойной ход по длине и ширине обрабатываемой заготовки, мм;

l_2 и ΔB_2 – конечные перебеги, мм;

l и B – соответственно длина и ширина обрабатываемой заготовки, мм;

V – средняя скорость резания, м/мин;

S – подача, мм/дв.ход;

$i = t_{пр}/t$ – число проходов,

где $t_{пр}$ – общий припуск на обработку, мм;

t – глубина резания, мм.

3.5. Обработка осевым размерным инструментом

3.5.1. Технологическое назначение операций сверления, зенкерования и развертывания

Сверление – технологический способ получения и обработки глухих и сквозных цилиндрических отверстий в сплошном материале. Процесс, при котором в результате обработки сверлом увеличивается диаметр ранее полученного отверстия, называется **расверливанием**.

В зависимости от конструкции и назначения различают сверла спиральные, шнековые, перовые (для глубокого сверления), центровые и др. (рис. 3.19). Самым распространенным способом получения отверстий глубиной до 5 диаметров сверла является сверление спиральным сверлом.

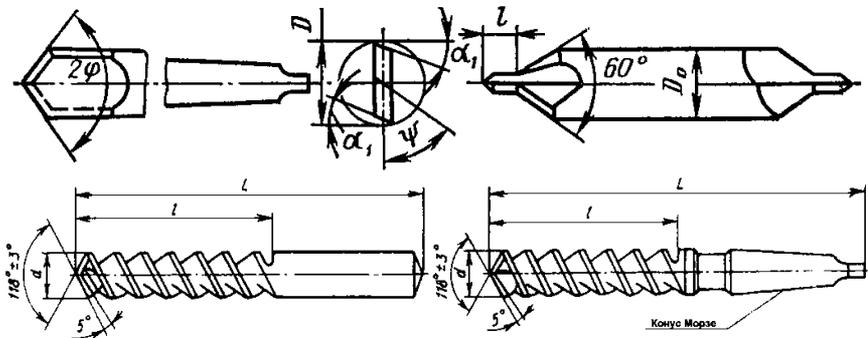


Рис. 3.19. Основные типы сверл

Просверленные отверстия, как правило, не имеют абсолютно правильной цилиндрической формы. Их поперечные сечения имеют форму овала, продольные – небольшую конусность. Диаметры просверленных отверстий всегда больше диаметра сверла, которым они просверлены. Разность диаметров сверла и просверленного им отверстия принято называть *разбивкой* отверстия, которая тем больше, чем больше диаметр сверла. Для стандартных сверл диаметром 10...20 мм разбивка составляет 0,15...0,25 мм. Причиной разбивки отверстий являются недостаточная точность заточки сверл и несоосность сверла и шпинделя сверлильного станка.

Сверление обеспечивает получение отверстий с точностью 11...13-го квалитета и шероховатостью обработанной поверхности по $Ra = 6,3...25$ мкм. Наиболее часто сверлением получают отверстия для болтовых соединений и для нарезания в них внутренней крепежной резьбы. Для улучшения качества поверхности и точности формы получаемых отверстий служат операции зенкерования и развертывания.

Зенкерование – технологический способ обработки предварительно просверленных отверстий или отверстий, изготовленных литьем и штамповкой, с целью получения более точных по форме и размеру цилиндрических отверстий, чем при сверлении. Точность обработки соответствует следующим квалитетам: предварительное зенкерование – 11...12-му, чистовое – 9...10-му; шероховатость поверхности составляет: $Ra = 12,5...25$ мкм (предварительное), $Ra = 6,3...12,5$ мкм (чистовое). Фаски в отверстиях обрабатываются зенкованием; цилиндрические углубления и торцовые поверхности отверстий получают цекованием. Используемые для этих целей инструменты – зенковки и цековки – являются нестандартными зенкерами.

Стандартные зенкеры имеют от трех до восьми зубьев. Наиболее часто на практике встречаются зенкеры с тремя винтовыми зубьями, смещенными на 120° друг относительно друга. Через точки главных режущих кромок трех зубьев, лежащих в плоскости вращения, перпендикулярной геометрической оси зенкера, можно провести концентрические окружности. Это геометрическое свойство трехзубых зенкеров обеспечивает их самоцентрирование и получение после зенкерования отверстий более правильной цилиндрической формы и с более точным размером диаметра, чем при сверлении.

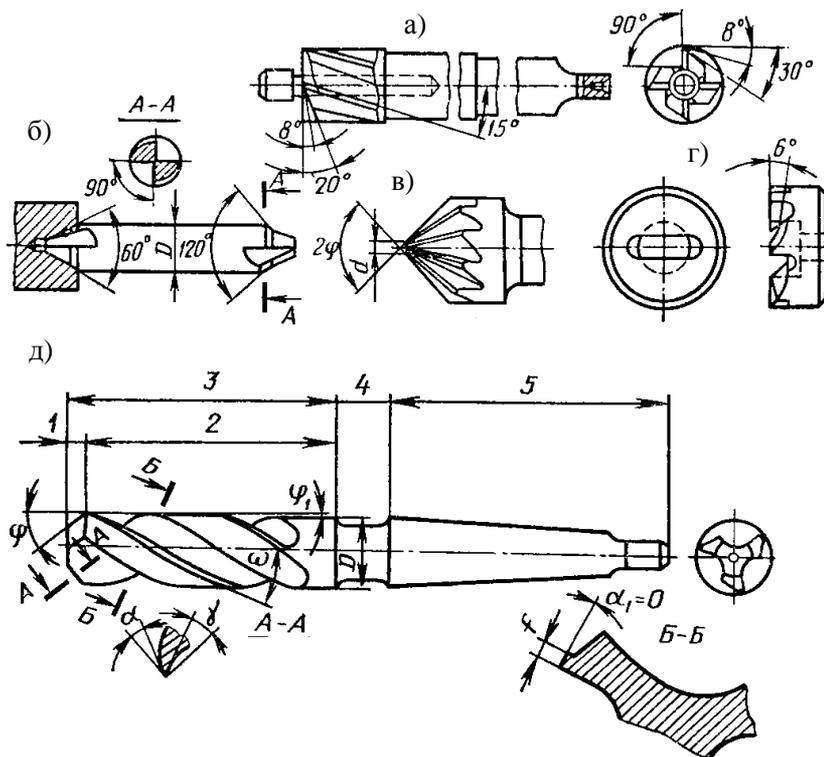


Рис. 3.20. Общий вид и геометрические параметры режущей части цековок (а), зенковок (б, в) и зенкеров (г, д)

Развертывание – технологический способ завершающей обработки просверленных и зенкероанных отверстий с целью получения точных по форме цилиндрических отверстий с малой шероховатостью поверхности, обеспечивающий получение размеров по 8...9-му (при черновом) и 5...6-му (при чистовом) квалитетам точности и шероховатость обработанной поверхности $Ra = 2,5...5$ мкм (при черновом) и $0,63...1,25$ мкм (при чистовом) развертывании.

Отверстия развертываются развертками, имеющими четное число ($z > 4$) расположенных диаметрально друг против друга зубьев. Число зубьев разверток зависит от их диаметра:

$$z_p = 1,5 \cdot \sqrt{d_p} + (2...4),$$

где d_p – диаметр развертки, мм.

Наличие на развертках большого числа зубьев обеспечивает устойчивое их центрирование в обрабатываемых отверстиях, что позволяет достигать высокой точности размера диаметра обработанных отверстий и малой шероховатости их стенок.

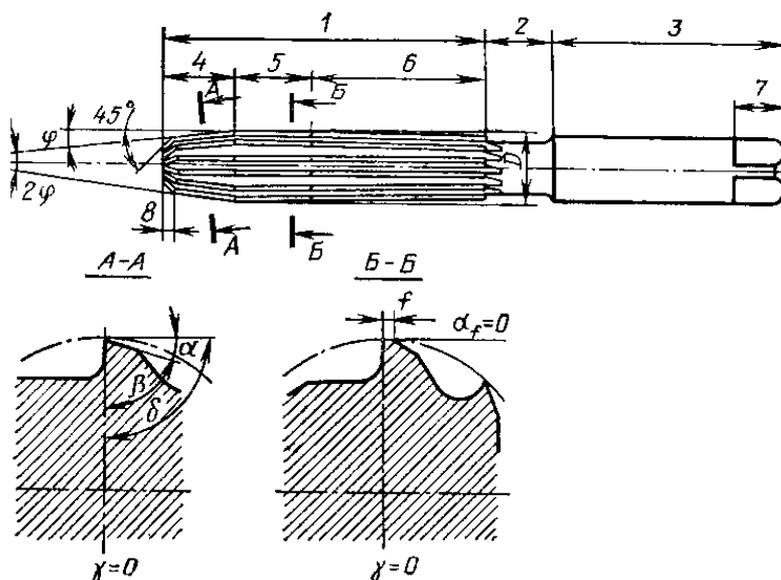


Рис. 3.21. Конструктивные элементы и геометрические параметры разверток

3.5.2. Схемы и элементы режима резания при сверлении, зенкервании, развертывании

Схемы резания при обработке отверстий сверлением, зенкерванием и развертыванием приведены на рис. 3.22. Во всех случаях вращательное движение инструмента вокруг своей оси является главным движением резания, а поступательное движение инструмента в осевом направлении – движением подачи S (в мм/об). Главное движение определяет скорость резания V (в м/мин), численно равную скорости на максимальном диаметре обработки:

$$S = n \cdot S_z,$$

где n – число режущих лезвий инструмента;

S_z – подача на зуб;

$$V = \frac{\pi \cdot D_{\text{ин}} \cdot n_{\text{ин}}}{1000},$$

где $D_{\text{ин}}$ и $n_{\text{ин}}$ – диаметр и частота вращения инструмента (сверла, зенкера или развертки соответственно).

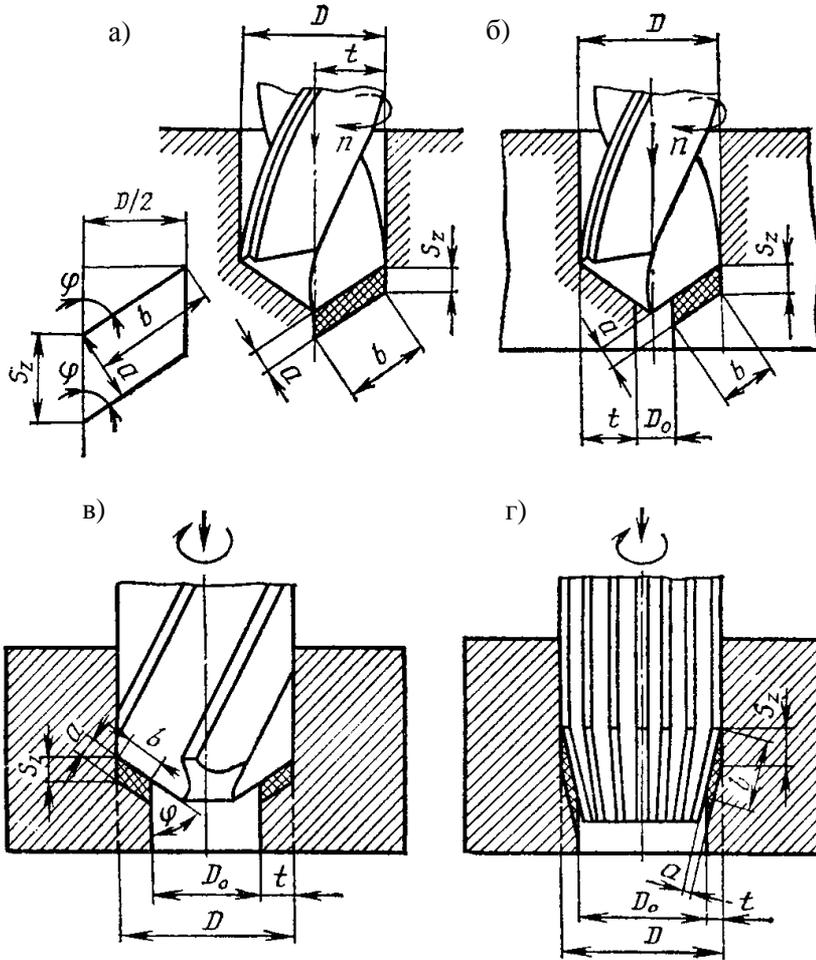


Рис. 3.22. Схемы резания при сверлении (а), рассверливании (б), зенкерования (в) и развертывании (г)

Глубина резания t (в мм) при сверлении равна половине диаметра сверла, а при рассверливании – половине разности диаметров сверла и рассверливаемого отверстия. Глубина резания t_3 при зенкерованиях отверстий диаметром d_0 равна

$$t_3 = 0,5 \cdot (d_3 - d_0).$$

Назначение глубины резания t_3 зависит от диаметра отверстий и механических свойств обрабатываемых металлов: чем больше диаметр отверстия, тем больше глубина резания. Ориентировочно

$$t_3 = (0,05 \dots 0,1) d_3,$$

где d_3 – диаметр зенкера.

Более точно значение t_3 определяют исходя из назначения минимального припуска на обработку или выбирают по нормативным таблицам. Глубина резания при развертывании зенкерованных отверстий

$$t_p = 0,5 \cdot (d_p - d_3)$$

невелика и в зависимости от диаметра развертки составляет 0,1...0,4 мм.

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя (площадь среза) равна:

на два режущих лезвия

$$f = t \cdot S = \frac{S \cdot D_{\text{св}}}{2}, \text{ мм}^2;$$

на одно режущее лезвие (на один зуб)

$$f_z = \frac{S \cdot D_{\text{св}}}{4}, \text{ мм}^2,$$

где $D_{\text{св}}$ – диаметр сверла.

При сверлении, зенкерованиях и развертывании расчет основного технологического времени t_0 при обработке сквозных отверстий (рис. 3.23) ведут по формуле

$$T_0 = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{n \cdot S},$$

где $l_1 = t \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)$, для сверления $t = 0,5D$;

l_2 – глубина сквозного отверстия;

$l_3 = (3 \dots 5) S$ – перебег при выходе из просверленного отверстия;

n – частота вращения шпинделя;

S – подача.

При обработке глухих отверстий используется формула

$$T_0 = \frac{l_1 + l_2}{n \cdot S}.$$

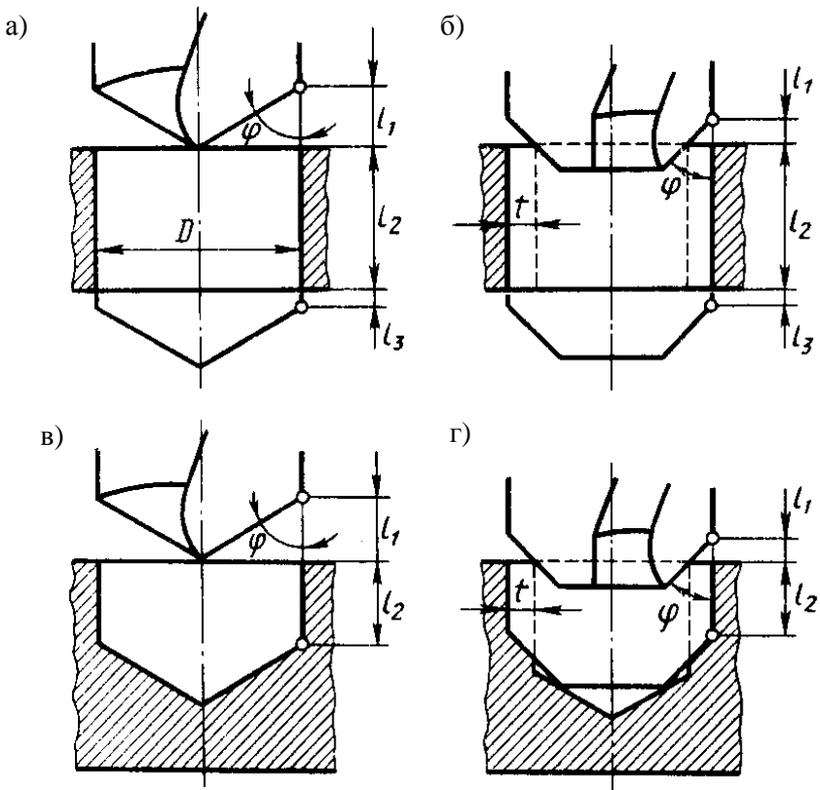


Рис. 3.23. Схемы для определения основного времени для сверления (а, в) и зенкерования или развертывания (б, г) сквозных (а, б) или глухих отверстий

3.5.3. Динамика процесса резания при сверлении, зенкеровании и развертывании

В процессе резания осевым размерным инструментом необходимо учитывать, что процесс образования стружки протекает в более тяжелых условиях, чем при точении, затруднен отвод стружки из зоны резания, меняется значение скорости резания по длине режущей кромки. Для сверл характерно значительное изменение главных заднего и переднего углов при движении вдоль режущей кромки от периферии сверла к его оси.

При зенкеровании, сверлении, развертывании важную роль играют осевые силы и моменты, действующие на режущую часть инструмента и направленные вдоль его оси. При правильной заточке геометрические параметры режущих лезвий одинаковы для их точек, лежащих в одной плоскости, перпендикулярной оси инструмента. Это обеспечивает действие результирующей осевой силы вдоль геометрической оси инструмента, а также отсутствие радиальных сил, вызывающих увод инструмента и искривление оси получаемых или обрабатываемых отверстий.

Осевая сила для практически встречающегося диапазона глубин резания t , подач S и диаметров D сверл, зенкеров и разверток аппроксимируется уравнением:

$$P = C_p \cdot D^{n_p} \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot HB^{z_p}, \text{ Н.}$$

Результирующий момент вращения

$$M_B = C_M \cdot D^{n_M} \cdot t^{x_M} \cdot S^{y_M} \cdot HB^{z_M}, \text{ Н} \cdot \text{ м,}$$

где C_p и C_M – константы, учитывающие свойства обрабатываемого материала и условия обработки;

D – диаметр инструмента, мм;

t – глубина резания, мм;

S – подача, мм/об;

HB – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю;

$n_p, n_M, x_p, x_M, y_p, y_M, z_p, z_M$ – показатели степени.

3.5.4. Конструктивные элементы, геометрические параметры и заточка спирального сверла

На рис. 3.24 показана конструкция спиральных сверл с коническим и цилиндрическим хвостовиками. *Сверло* состоит из рабочей части 1 с режущей частью 2, шейки 3 и хвостовика 4 с лапкой 5 (или поводком 6). Элементы рабочей части спирального сверла показаны на рис. 3.25.

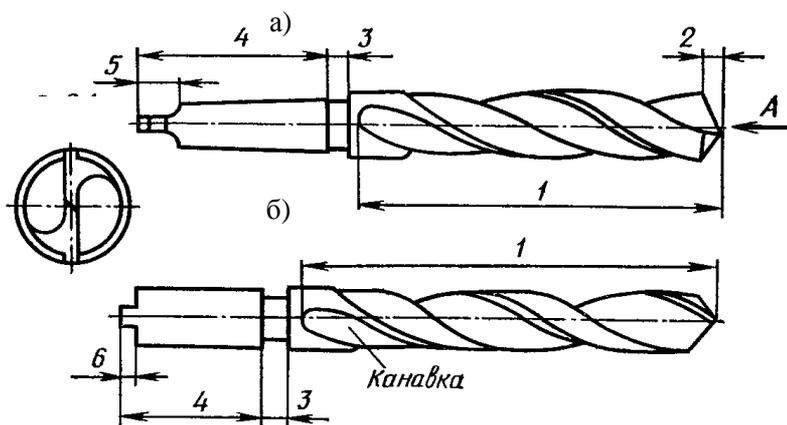


Рис. 3.24. Спиральные сверла с коническими (а) и цилиндрическими (б) хвостовиками

Сверло имеет: две главные режущие кромки 1, образованные пересечением передних 2 (винтовые поверхности канавки 7, по которым сходит стружка) и главных задних 3 (поверхности, обращенные к поверхности резания) поверхностей лезвия, выполняющих основную работу резания; поперечную режущую кромку 4, образованную пересечением двух главных задних поверхностей, и две вспомогательные режущие кромки 5, образованные пересечением передней поверхности со вспомогательной задней поверхностью лезвия 6.

Вспомогательные режущие кромки 5 принимают участие в резании на длине, определяемой величиной подачи. Ленточка 6 сверла – узкая полоска на его цилиндрической поверхности, расположенная вдоль винтовой канавки, – обеспечивает направление сверла при резании. Благодаря наличию двух спиральных канавок сверло имеет два зуба 8 со спинками 9.

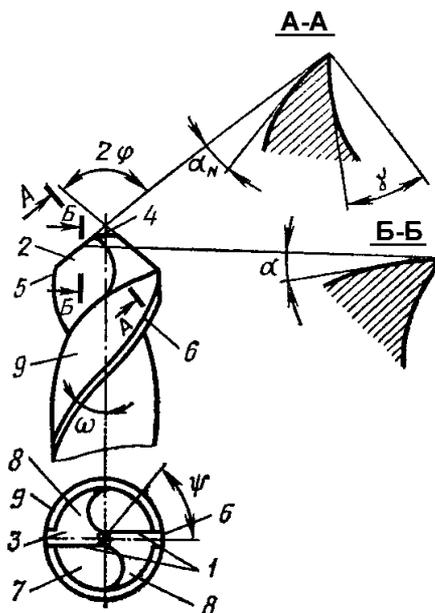


Рис. 3.25. Элементы рабочей части спирального сверла

Угол наклона винтовой канавки – это угол между осью сверла и касательной к винтовой линии по наружному диаметру сверла; обычно выбирается в пределах $18...30^\circ$.

Угол наклона поперечного режущего лезвия ψ – это острый угол между проекциями поперечной и главной режущих кромок на плоскость, перпендикулярную к оси сверла; обычно равен $50...55^\circ$.

Угол при вершине 2ϕ – это угол между главными режущими кромками; при сверлении стали средней твердости равен $116...120^\circ$, твердых сталей – 125° .

Передний угол γ – это угол между касательной к передней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и нормалью в той же точке к поверхности вращения режущей кромки вокруг оси сверла. Этот угол рассматривается в плоскости АА, перпендикулярной к главной режущей кромке. По длине режущей кромки передний угол γ является величиной переменной. По мере приближения к оси сверла передний угол уменьшается, и у поперечной режущей кромки принимает отрицательное значение.

Задний угол лезвия α – это угол между касательной к задней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и касательной в той же точке к окружности ее вращения вокруг оси сверла. Он рассматривается в плоскости ББ, направленной по касательной к окружности в данной точке и параллельной оси сверла. Задний угол α_N в нормальной плоскости АА может быть определен по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi .$$

Задний угол сверла – величина переменная: у периферии $\alpha = 8 \dots 14^\circ$, а по мере приближения к поперечной режущей кромке достигает $20 \dots 26^\circ$.

Сверла затачивают по задней поверхности. Наиболее распространена коническая заточка (когда заднюю поверхность сверла получают на специальных станках в виде части поверхности конуса), обеспечивающая увеличение заднего угла по мере приближения к поперечной кромке.

3.5.5. Назначение режимов резания при сверлении, зенкерowaniu и развертывании

При сверлении по глубине и диаметру обрабатываемого отверстия выбирают серию сверла, а в зависимости от физических и механических свойств обрабатываемого материала – форму и геометрические параметры его заточки. При зенкерowaniu и развертывании до задания конструктивных и геометрических параметров инструмента необходимо определить место операции среди последовательных операций обработки отверстия и назначить глубину резания.

Затем выбирают технологически допустимую подачу и корректируют ее по паспорту станка.

Назначают период стойкости инструмента, определяют скорость резания и корректируют ее по паспорту станка.

Затем проверяют режимы резания на ограничения по величине осевой силы и мощности в зоне резания и нормируют операцию (рассчитывают технологические нормы времени).

3.6. Обработка металлов фрезерованием

3.6.1. Технологическое назначение операции фрезерования

Фрезерование является производительным и универсальным технологическим способом механической обработки плоских и фасонных поверхностей, пазов и уступов фрезами.

Фрезерованием обрабатываются горизонтальные, вертикальные и наклонные плоскости, уступы, канавки прямоугольного и профильного сечения (в том числе – винтовые), пазы, узкие и глубокие прорезы, шлицы на головках шурупов и винтов, фасонные поверхности различных профилей с прямолинейными и криволинейными образующими. С помощью фрезерования обрабатываются различные поверхности, в том числе – тела вращения, прямые профильные образования на цилиндрах, прямые и винтовые зубчатые венцы на колесах, прямые и винтовые шлицевые канавки, резьбовые поверхности на нормализованном и специальном крепеже, профильные канавки на торцах цилиндров, а также производится разрезка катаных прутков на мерные заготовки.

Показатели качества черновой обработки плоскостей и пазов фрезерованием равны 11...13-му качеству, $R_a = 12...25$ мкм, чистой – 9...11-му качеству, $R_a = 1,2...6,3$ мкм.

3.6.2. Основные типы фрез и их назначение

Цилиндрические фрезы (рис. 3.26) предназначены для установки на горизонтально-фрезерных станках при обработке плоских поверхностей шириной до 120 мм при условии, что ширина обрабатываемой поверхности на заготовке на 5...6 мм меньше длины рабочей части фрезы. При больших сечениях стружки для обеспечения спокойной работы без вибрации применяют крупнозубые цилиндрические фрезы с неравномерным шагом.

Цилиндрические фрезы имеют центральное базовое отверстие со шпоночной канавкой. Надетые на оправку станка, они зажимаются между кольцами с помощью затяжной гайки.

В настоящее время цилиндрические фрезы применяются ограниченно, тем не менее, на их примере можно выявить все особенности и закономерности процесса фрезерования. Определения геометри-

ческих и режимных параметров цилиндрических фрез справедливы и для фрез других разновидностей.

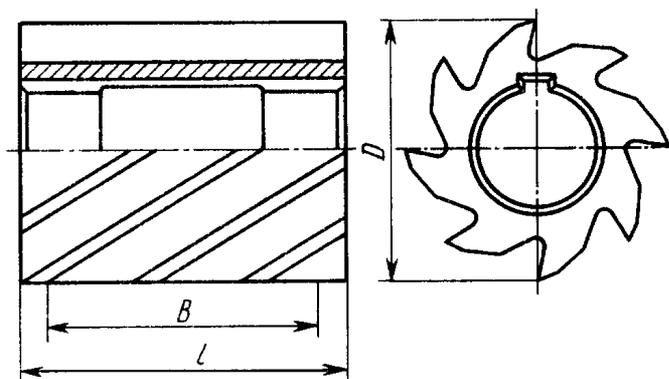


Рис. 3.26. Цилиндрическая фреза

Концевые фрезы (рис. 3.27) имеют наружный диаметр D рабочей части от 3 до 50 мм. Присоединительная часть этих фрез диаметром менее 14 мм – цилиндрическая, а более 20 мм – коническая. В диапазоне диаметров от 14 до 20 мм присоединительная часть может быть выполнена как цилиндрической, так и конической. Основным рабочим участком режущей части концевых фрез является цилиндрический участок длиной L , которым фрезеруется поверхность на заготовке шириной B ($B < L$), а также часть торцевой поверхности, на которой имеются режущие зубья.

Концевые фрезы применяют для обработки открытых пазов и копировально-фрезерной обработки стенок замкнутых профильных углублений и отверстий в плоских заготовках. Они предназначены, в основном, для работы на вертикально-фрезерных, но могут быть использованы и на горизонтально-фрезерных станках.

Торцовые фрезы (рис. 3.28) отличаются от концевых соотношением размеров D/L (для торцовых $D/L = 4...6$; для концевых $D/L = 0,2...0,5$). Стандартные торцовые фрезы имеют диаметры $D = 60... 600$ мм и цилиндрические отверстия для установки на шпинделе станков. Они предназначены для обработки плоских поверхностей, лежащих в одной и в разных по высоте плоскостях. Торцовыми фрезами больших диаметров можно за один проход об-

работать заготовки шириной до 500 мм. Такие фрезы применяются на мощных горизонтально- и вертикально-фрезерных, а также на агрегатных станках.

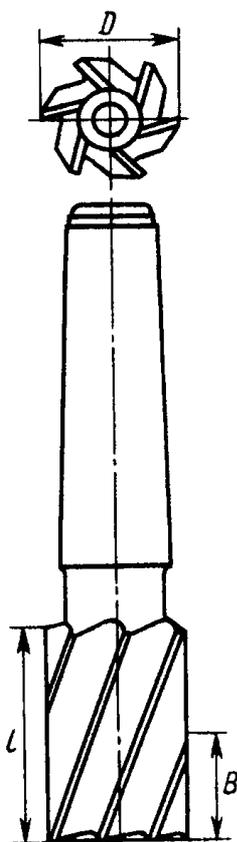


Рис. 3.27. Концевая фреза

Дисковые фрезы (рис. 3.29) имеют диаметр $D = 60 \dots 110$ мм и цилиндрические базовые отверстия для крепления на оправке. Режущие зубья таких фрез выполняются на цилиндрической внешней поверхности, а также на одной (односторонние) или на обеих (двусторонние) торцовых поверхностях. Дисковые фрезы предназначены для фрезерования канавок различного назначения шириной $6 \dots 16$ мм.

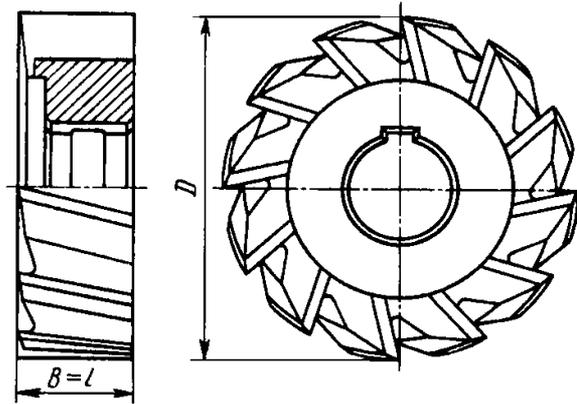


Рис. 3.28. Торцовая фреза

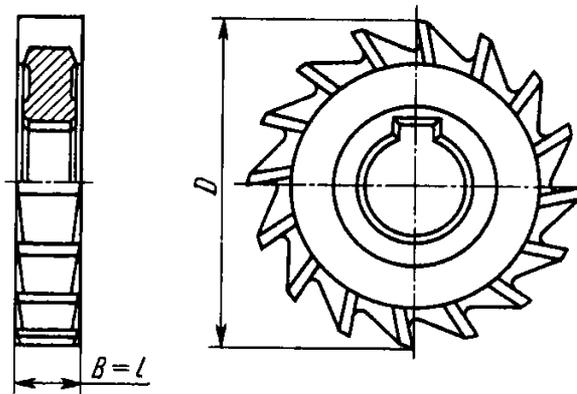


Рис. 3.29. Дисконная трехсторонняя фреза

Отрезные фрезы (рис. 3.30) предназначены для резки катаных прутков на мерные заготовки на горизонтально-фрезерных станках. Зубья этих фрез выполнены только на внешнем диаметре. Отрезные фрезы имеют рабочий диаметр $D = 60 \dots 200$ мм и ширину $B = 1 \dots 5$ мм.

Шлицевые фрезы (рис. 3.31) предназначены для фрезерования узких щелей и шлицев в головках винтов и шурупов. Они имеют диаметры $D = 40 \dots 75$ мм и ширину $B = 0,2 \dots 5$ мм.

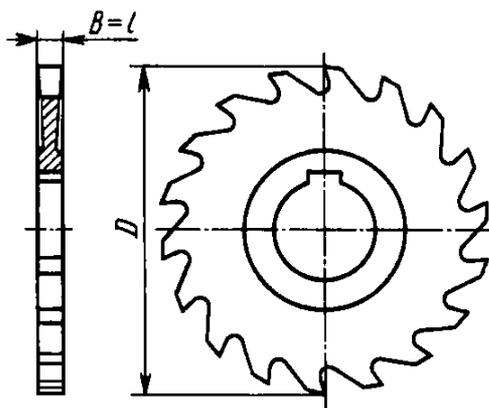


Рис. 3.30. Отрезная фреза

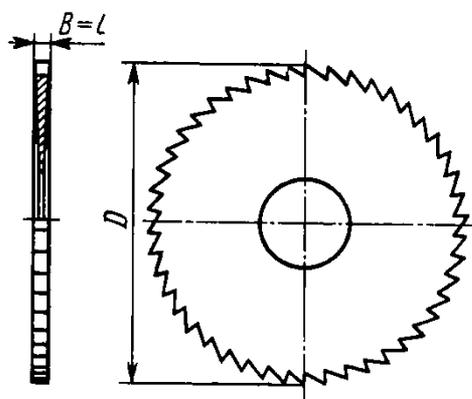


Рис. 3.31. Шлицевая (прорезная) фреза

Шпоночные фрезы (рис. 3.32) используются для фрезерования шпоночных канавок. Стандартные шпоночные фрезы имеют диаметр 3...40 мм и устанавливаются на вертикально- и горизонтально-фрезерных станках.

Угловые фрезы (рис. 3.33) предназначены для фрезерования профильных угловых канавок в инструментальном производстве. Такие фрезы имеют диаметры 35...90 мм и применяются на универсально-фрезерных станках.

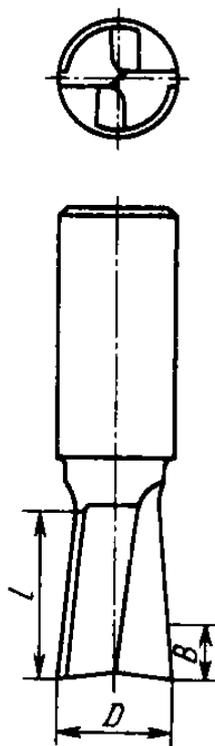


Рис. 3.32. Шпоночная фреза

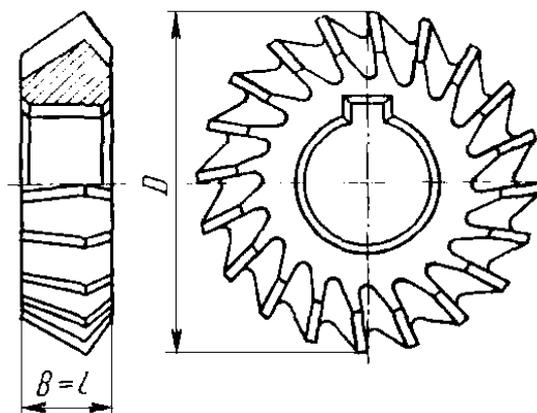


Рис. 3.33. Угловая фреза

Фасонные фрезы имеют различный профиль лезвий. На рис. 3.34 в качестве примера показана фреза с выпуклым полукруглым профилем лезвия. Фасонные фрезы предназначены для фрезерования канавок и выступов фасонного профиля, имеют диаметры от 45 до 90 мм, применяются преимущественно на горизонтально-фрезерных станках.

Большинство конструкций фрез стандартизировано.

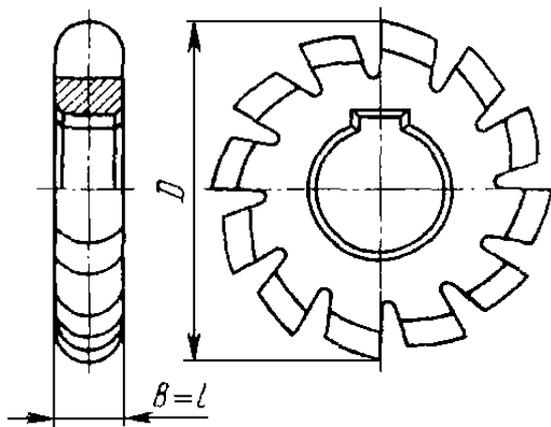


Рис. 3.34. Фасонная фреза

3.6.3. Разновидности фрезерования

По расположению зубьев относительно оси фрезы различают **цилиндрическое** и **торцовое фрезерование**. В зависимости от расположения фрезы относительно детали торцовое фрезерование разделяют на **симметричное** (рис. 3.35 а) и **несимметричное** (рис. 3.35 б). Кроме того, в зависимости от ширины детали симметричное торцовое фрезерование может быть **полным** (рис. 3.35 а) и **неполным** (рис. 3.35 в). При фрезеровании торцовыми и концевыми фрезами основную работу резания выполняют боковые (главные) режущие кромки; торцовые кромки производят лишь зачистку обработанной поверхности.

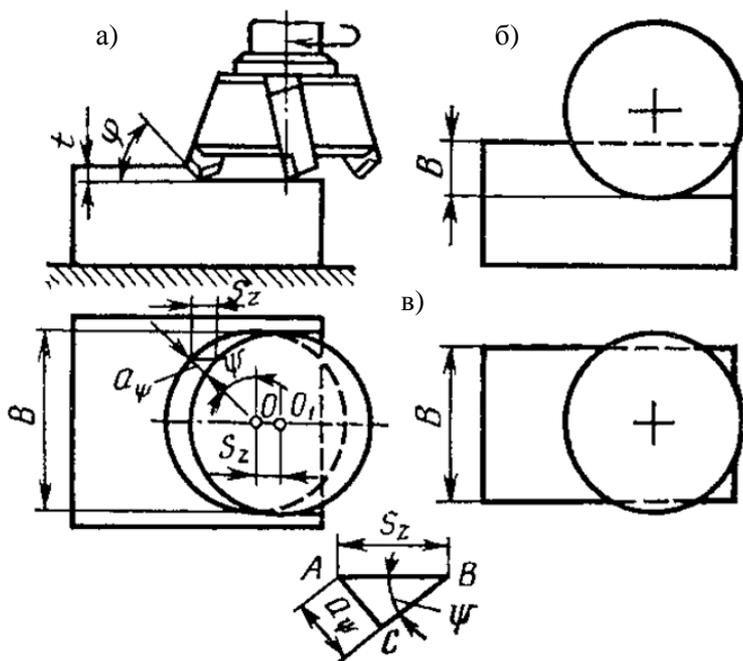


Рис. 3.35. Принятые схемы фрезерования:
 а – полное симметричное; б – несимметричное; в – неполное

При торцовом фрезеровании для достижения производительных режимов резания следует придерживаться следующих правил. Диаметр фрезы D должен быть больше ширины фрезерования B :

$$D = (1,25 \dots 1,5) \cdot B.$$

При обработке стальных заготовок обязательным является их несимметричное расположение относительно фрезы: для заготовок из конструкционных углеродистых и легированных сталей – их сдвиг в направлении врезания зуба фрезы, чем обеспечивается начало резания при малой толщине срезаемого слоя; для заготовок из жаропрочных и коррозионностойких сталей – сдвиг в сторону выхода зуба фрезы из зоны резания, чем обеспечивается выход зуба из резания с минимально возможной толщиной срезаемого слоя. Несоблюдение указанных правил приводит к значительному снижению стойкости инструмента.

Зуб торцевой фрезы имеет две режущие кромки (рис. 3.36): 1-2 – главная; 1-3 – вспомогательная. Главный передний угол рассматривается в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке (сечение Б-Б). Иногда передний угол задается в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы; его обозначают γ' и называют поперечным передним углом. Между углами γ и γ' существует определенная зависимость. Так, для торцовых фрез с угловой режущей кромкой, расположенной под углом φ к торцу:

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma' \cdot \sin \varphi + \operatorname{tg} \omega \cdot \cos \varphi.$$

Для цилиндрических, концевых и дисковых фрез со спиральными зубьями

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma' \cdot \cos \omega,$$

где ω – угол наклона спирального зуба к оси фрезы;

φ – главный угол в плане.

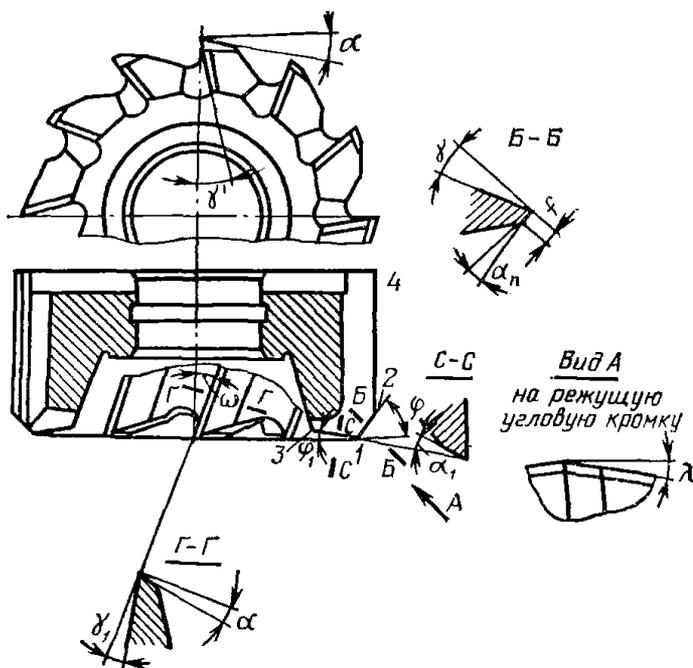


Рис. 3.36. Геометрия торцевой фрезы

Для фрез из быстрорежущей стали главный передний угол γ в зависимости от качества обрабатываемого материала принимается в пределах $5...30^\circ$. Для торцовых твердосплавных фрез $\gamma = +10^\circ...-20^\circ$. Главный задний угол α рассматривается в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы. Угол α образуется касательной к задней поверхности зуба фрезы в данной точке режущей кромки и касательной к траектории движения точки режущей кромки, принимаемой за окружность. Иногда главный задний угол рассматривается в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке (сечение Б-Б); его обозначают α_n и называют нормальным задним углом. Для цилиндрических фрез с винтовыми зубьями

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\alpha_n \cdot \cos\omega.$$

Для главной режущей кромки торцовых фрез

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\operatorname{tg}\alpha_n}{\sin\varphi}$$

Главный задний угол для фрез из быстрорежущей стали выбирается в пределах $12...30^\circ$, для торцовых твердосплавных фрез – $10...25^\circ$.

Главный угол в плане образуется проекцией главной режущей кромки на осевую плоскость, проходящую через вершину зуба, и направлением подачи. С уменьшением угла φ уменьшается и толщина срезаемого слоя. Торцовые фрезы с углом $\varphi = 10...30^\circ$ применяют лишь при жесткой технологической системе и глубине резания $t = 3...4$ мм; при этом $\varphi = 60^\circ$. Вспомогательный угол в плане у торцовых фрез уменьшает побочное трение и назначается в пределах $2...10^\circ$. Угол наклона главной режущей кромки (угол между режущей кромкой и ее проекцией на осевую плоскость, проходящую через вершину зуба) оказывает влияние на прочность зуба и стойкость фрезы. У торцовых твердосплавных фрез угол λ выполняется в пределах $5...15^\circ$ при обработке стали и $-5...+15^\circ$ – при обработке чугуна. Угол наклона винтовых зубьев ω обеспечивает более равномерное фрезерование и уменьшает мгновенную ширину среза при врезании. Он выбирается в пределах $10...30^\circ$.

Фрезерование цилиндрическими фрезами можно выполнять двумя способами: против подачи (рис. 3.37 а), когда фреза вращается против направления подачи (*встречное фрезерование*), и по подаче (рис. 3.37 б), когда вращение фрезы и направление подачи совпадают (*попутное фрезерование*).

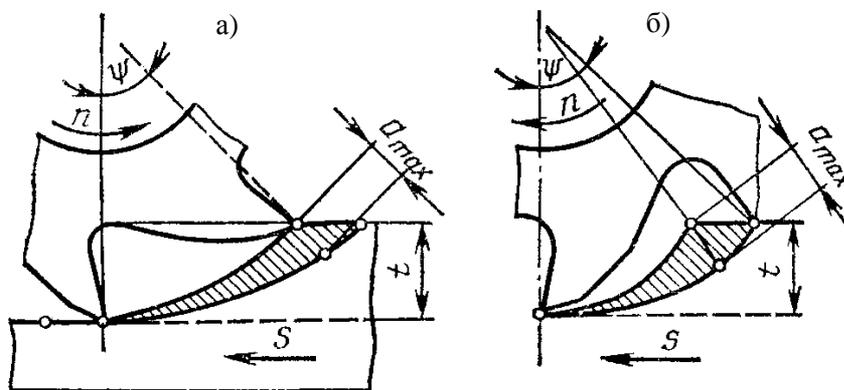


Рис. 3.37. Встречное (а) и попутное (б) фрезерование

При встречном фрезеровании толщина снимаемого слоя материала и нагрузка на зуб фрезы возрастают постепенно. В первоначальный момент зуб фрезы вследствие наличия радиуса округления режущей кромки выполняет не резание, а сжатие. Это приводит к повышенному износу зуба фрезы по задней поверхности и вызывает дополнительный наклеп обработанной поверхности, что ухудшает ее шероховатость.

При попутном фрезеровании зуб фрезы начинает работать с максимальной толщиной среза, и поэтому в первый же момент воспринимает наибольшую нагрузку. Затрачиваемая мощность при этом на 10...15 % меньше, чем при фрезеровании против подачи. Однако попутное фрезерование невозможно осуществить при наличии у заготовки твердой корки (например, в отливке или поковке) и требует применения специальных механизмов для предохранения ходового винта продольной подачи и маточной гайки от поломок. В связи с этим попутное фрезерование возможно только на специально приспособленных станках.

3.6.4. Элементы режима резания при фрезеровании

Глубина фрезерования, или глубина резания t , определяется толщиной срезаемого слоя материала, измеренной по перпендикуляру к обработанной поверхности (рис. 3.38 а).

Подача – это перемещение обрабатываемой детали относительно фрезы при вращении последней. Различают три вида подачи: *минутную подачу* S_M – перемещение обрабатываемой детали в миллиметрах за одну минуту; *подачу на оборот* S_0 – перемещение обрабатываемой детали в миллиметрах за один оборот фрезы; *подачу на зуб* S_z – подачу обрабатываемой детали в миллиметрах, приходящуюся на один зуб фрезы. При этом

$$S_M = S_0 \cdot n = S_z \cdot n \cdot z,$$

где n – частота вращения фрезы, об/мин;
 z – число зубьев фрезы.

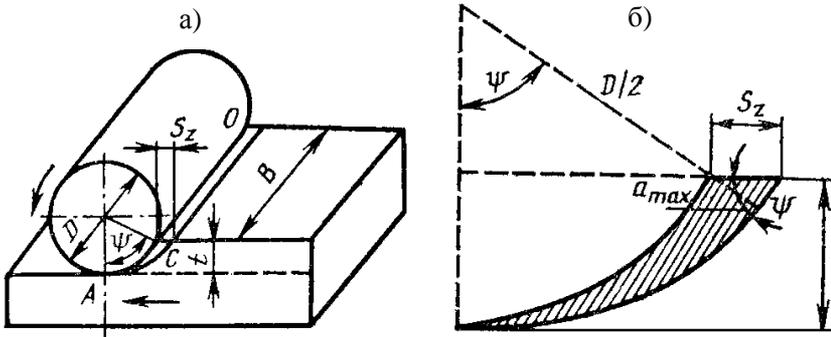


Рис. 3.38. Схема и элементы режима резания при фрезеровании

Подачей на зуб пользуются при расчете режимов резания. Ее определяют по справочным таблицам в зависимости от обрабатываемого материала, мощности станка, конструкции фрезы. Так, для цилиндрической фрезы при обработке конструкционной стали $S_z = 0,03 \dots 0,6$ мм на зуб, чугуна и медных сплавов - $0,08 \dots 0,8$ мм на зуб. Фрезерные станки настраивают по величине минутной подачи.

Скорость резания V , т.е. окружная скорость вращения фрезы, подсчитывается по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{ м/мин,}$$

где D – наружный диаметр фрезы, мм.

Площадь среза при фрезеровании цилиндрической прямозубой фрезой для одного зуба фрезы

$$f = B \cdot a, \text{ мм}^2,$$

где B – ширина фрезерования, мм;

a – толщина среза, мм.

Толщиной среза a называют толщину срезаемого одним зубом слоя, измеренную по направлению радиуса фрезы. При фрезеровании поперечное сечение среза имеет вид «запятой» (рис. 3.38 б). Наибольшего значения при встречном фрезеровании толщина среза достигает при выходе фрезы из обрабатываемой заготовки.

Максимальная толщина среза

$$a_{\max} = S_z \cdot \sin \psi, \text{ мм,}$$

где ψ – угол контакта фрезы с деталью – центральный угол, соответствующий дуге соприкосновения фрезы с заготовкой:

$$\cos \psi = 1 - 2t/D.$$

Площадь среза при фрезеровании цилиндрической прямозубой фрезой – величина переменная, периодически изменяющаяся в процессе фрезерования, т.к. в каждый отдельный момент времени в работе находится неодинаковое число зубьев. Поэтому силы, момент и мощность резания периодически меняются. Чем большее число зубьев находится одновременно в работе, тем более спокойно протекает процесс фрезерования. При работе фрезами с прямым зубом добиться полной равномерности фрезерования невозможно. Фрезерование фрезой с винтовыми зубьями происходит более спокойно, так как суммарная площадь среза изменяется в меньших пределах.

3.6.5. Условие равномерности фрезерования

Непостоянство толщины и ширины срезаемого слоя (отличительная черта фрезерования), ведет к колебаниям сил резания и вызывает появление вибраций в технологической системе, увеличение шероховатости обработанных поверхностей, повышенный износ инструмента, снижение точности обработки.

При использовании цилиндрических фрез с винтовым зубом в контакте с обрабатываемой деталью одновременно находится несколько ее режущих зубьев, причем в пределах поверхности резания некоторые зубья только вступают в работу, в то время как другие ее заканчивают. Выбором режимных параметров и геометрии фрезы можно создать условия, когда суммарная толщина срезаемого слоя в любой момент времени будет постоянной, тем самым обеспечивая равномерность фрезерования.

На рис. 3.39 а на поверхности резания R, изображенной в виде развертки на плоскость, показаны следы трех одновременно режущих винтовых зубьев: I, II и III. При вращении фрезы каждый ее зуб начинает резание в точке 1. В это мгновение ширина и толщина среза равны нулю. По мере вращения фрезы режущие кромки ее зубьев перемещаются справа налево по поверхности резания. Линии контакта зубьев с поверхностью резания на ее развертке имеют вид прямых, которые образуют с осью фрезы угол наклона ω . Рабочий цикл каждого зуба заканчивается в точке 4.

Расстояние между смежными зубьями, измеренное в плоскости вращения фрезы, перпендикулярной ее оси, называется *торцовым шагом*:

$$l_1 = \pi \cdot D/z ,$$

где z – число зубьев фрезы;

D – наружный диаметр фрезы.

Расстояние между смежными зубьями, измеренное вдоль оси фрезы (ширины фрезерования B), называется *осевым шагом*:

$$l_2 = B/K ,$$

где K – коэффициент кратности, показывающий, сколько раз осевой шаг укладывается на ширине фрезерования.

Торцовый l_1 и осевой l_2 шаги связаны с углом наклона винтового зуба фрезы соотношением

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{l_1}{l_2} = \frac{\pi \cdot K \cdot D}{z \cdot B},$$

откуда

$$K = \frac{z \cdot B \cdot \operatorname{tg} \omega}{\pi \cdot D}.$$

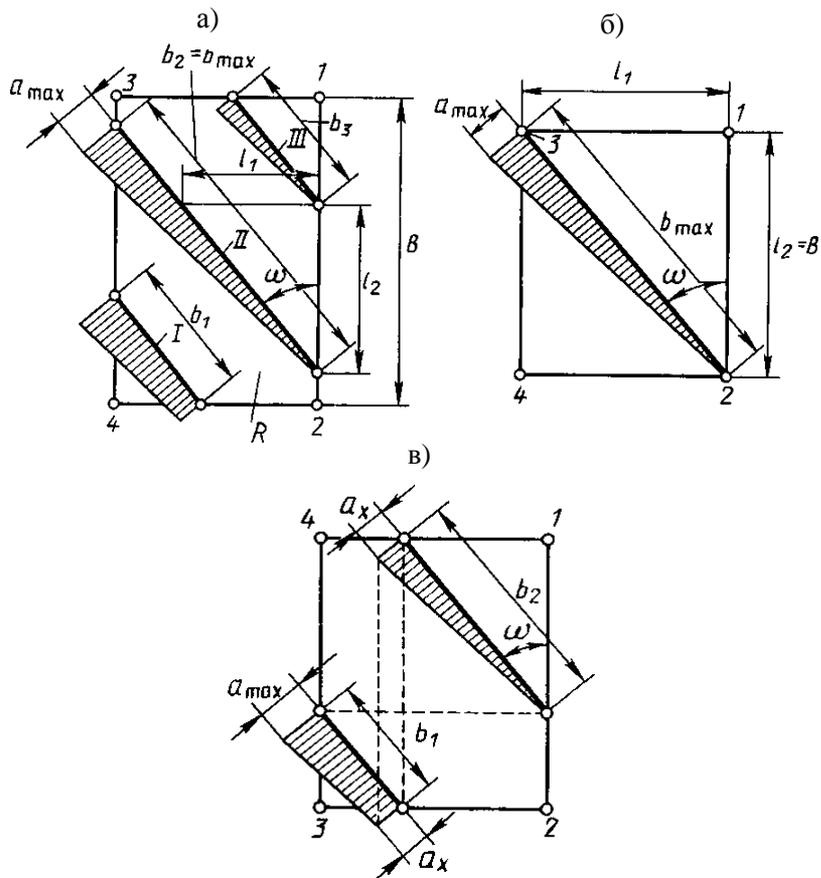


Рис. 3.39. Условие равномерности фрезерования

В частных случаях, когда осевой шаг фрезы один или более раз целиком и без остатка укладывается на ширине фрезерования, коэффициент кратности является целым числом; в остальных, более общих случаях коэффициент кратности – число дробное.

При $K = 2$ хотя бы один из зубьев расположен так, что его след на развертке пересекает под углом ω поверхность резания от линии 1-2 до линии 3-4 и, следовательно, ширина срезаемого слоя b для этого зуба максимальна (рис. 3.39 а). При $K = 1$ максимальная ширина слоя a_{\max} , срезаемого каждым режущим зубом, возможна при одном положении следа режущей кромки, когда на развертке он является диагональю развертки поверхности резания (рис. 3.39 б). Значение максимальной ширины слоя в этом случае определяется выражением

$$b_{\max} = l_1 / \sin \omega = l_2 / \cos \omega = B / \cos \omega.$$

При дальнейшем перемещении режущей кромки по поверхности резания ширина срезаемого слоя b начинает уменьшаться. Вместе с тем, после прохождения диагонального положения следа контакта рассматриваемого зуба в точке 1 поверхности резания в работу вступает очередной зуб, и на поверхности резания располагаются следы контакта двух режущих зубьев (рис. 3.39 в). Далее при вращении фрезы длина следа первого зуба при перемещении его в пределах поверхности резания сокращается до нуля, а длина следа второго зуба при приближении к диагональному положению возрастает до максимума. Рис. 3.39 в позволяет убедиться в том, что при $K = 1$ суммарная ширина двух режущих зубьев в любой момент времени равна ширине b_{\max} одного зуба, занимающего диагональное положение.

Эпюра толщины срезаемого слоя a , построенная вдоль ширины b_{\max} при $K = 1$, равна сумме эпюр (при коэффициенте кратности $K = 1$) толщины срезаемого слоя, построенных вдоль ширины b_1 на следе первого зуба и ширины b_2 на следе второго зуба (рис. 3.39 в).

Таким образом, при коэффициенте кратности $K = 1$ зубья фрезы, находящиеся в контакте с поверхностью резания, в любой момент времени срезают слой с постоянной площадью сечения. Аналогичные закономерности наблюдаются и при других целых значениях коэффициента кратности ($K = 2, 3, 4$ и т. д.).

Условие постоянства суммарной ширины и площади сечения слоя, срезаемого одним или несколькими зубьями фрезы при целых значениях коэффициента кратности K , принято определять как *условие равномерности фрезерования*.

3.6.6. Силы, крутящий момент и мощность при фрезеровании

При фрезеровании прямозубой цилиндрической фрезой на каждый ее зуб действует сила, которая может быть разложена на касательную составляющую силы резания, направленную по касательной к траектории движения режущей кромки зуба P_z , и радиальную силу, направленную по радиусу к центру фрезы P_y . Радиальные силы вызывают изгиб фрезерной оправки и действуют на подшипники шпинделя станка. Касательные (или окружные) силы создают крутящий момент резания, преодолеваемый крутящим моментом на шпинделе станка, и скручивают оправку. Равнодействующая сил P_y и P_z , – сила P – может быть разложена на горизонтальную составляющую P_r и вертикальную P_b , при этом горизонтальная сила воспринимается механизмом подачи станка, а вертикальная при встречном фрезеровании стремится оторвать обрабатываемую деталь от стола станка. При попутном фрезеровании вертикальная сила, наоборот, стремится прижать обрабатываемую деталь к столу станка.

Между отдельными составляющими сил резания имеют место следующие соотношения:

$$P_y = (0,4 \dots 0,6) \cdot P_z;$$

при встречном цилиндрическом фрезеровании

$$P_r = (1 \dots 1,2) \cdot P_z; \quad P_b = (0,2 \dots 0,3) \cdot P_z;$$

при попутном цилиндрическом фрезеровании

$$P_r = (0,8 \dots 0,9) \cdot P_z, \quad P_b = (0,7 \dots 0,9) \cdot P_z.$$

Крутящий момент при фрезеровании рассчитывают по формуле

$$M = \frac{1}{2} \cdot P_z \cdot D,$$

где M – крутящий момент на фрезе, Н · м;

D – диаметр фрезы, м.

Мощность фрезерования, кВт,

$$N = \frac{M \cdot n}{9750}.$$

3.6.7. Назначение режима резания при фрезеровании

Глубину резания при фрезеровании выбирают в зависимости от припуска на обработку. Черновое и получистовое фрезерование лучше вести за один проход, если это допускает мощность станка и жесткость технологической системы. При припуске на обработку более 5 мм фрезерование ведут в два или более проходов, оставляя на последний проход припуск 1...1,5 мм.

Подачу выбирают максимально возможной. Ее величина может быть ограничена следующими основными факторами: шероховатостью обработанной поверхности, прочностью зуба фрезы, прочностью механизма подачи станка, жесткостью технологической системы, прочностью и жесткостью оправки и др. При черновом фрезеровании стальных заготовок цилиндрическими фрезами из быстрорежущей стали принимают подачу на зуб $S_z = 0,06...0,6$ мм/зуб, при обработке чугуна – 0,08...0,8 мм/зуб, при черновом торцовом фрезеровании фрезами из быстрорежущей стали – 0,04...0,6 мм/зуб.

Скорость резания подсчитывают с учетом принятой глубины резания, подачи, характеристики фрезы (диаметр фрезы, число зубьев, материал режущей части фрезы), физико-механических свойств обрабатываемого материала и других условий:

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K,$$

где C_v – коэффициент, характеризующий материал заготовки и условия обработки;

T – период стойкости фрезы, мин;

t – глубина резания, мм;

S_z – подача, мм на зуб;

B – ширина фрезерования, мм;

z – число зубьев фрезы;

q, m, x, y, u, p – показатели степеней;

K – общий поправочный коэффициент, учитывающий изменения условий обработки.

Значения коэффициентов и показателей степеней берут из справочников.

По расчетной скорости резания определяют частоту вращения фрезы и корректируют ее по паспорту станка, выбирая ближайшую меньшую частоту вращения шпинделя. По фактической частоте вращения фрезы подсчитывают действительную скорость резания. Выбранный режим проверяют по мощности и крутящему моменту на шпинделе станка, а также по максимально допустимой силе подачи.

Основное (машинное) время при фрезеровании рассчитывается по общей формуле, где за расчетную длину прохода фрезы L принимают:

$$L = l + l_1 + l_2,$$

где l – длина фрезеруемой поверхности, мм;

l_1 – величина врезания, мм;

l_2 – величина пробега фрезы, $l_2 = 1 \dots 5$ мм (в зависимости от диаметра фрезы).

Величина врезания при фрезеровании цилиндрическими фрезами (рис. 3.40 а)

$$l_1 = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2} = \sqrt{t \cdot (D - t)}.$$

При фрезеровании торцовыми фрезами (рис. 3.40 б, в) величина врезания

$$l_1 = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{B^2}{4}} = 0,5 \cdot (D - \sqrt{D^2 - B^2}).$$

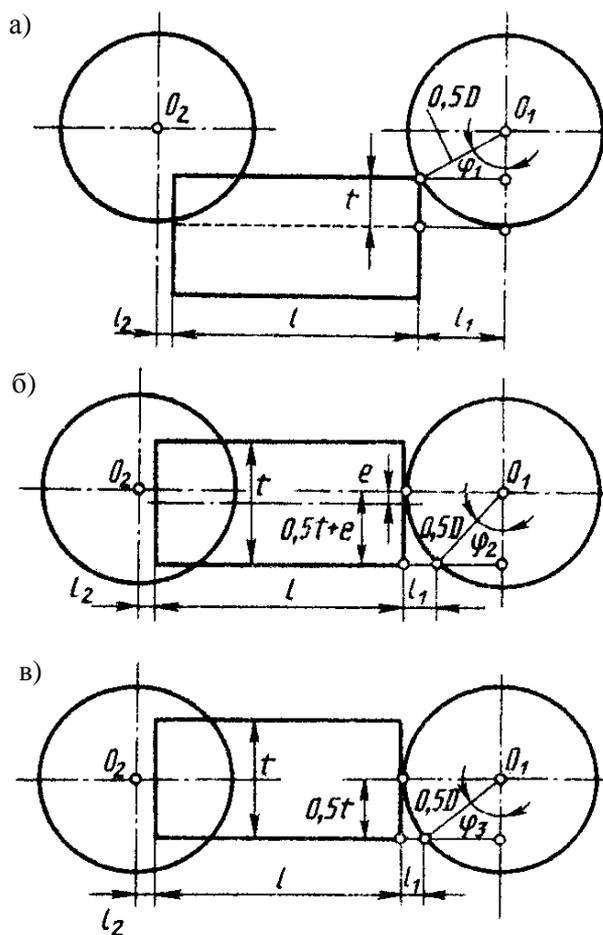


Рис. 3.40. Определение основного времени при фрезеровании

3.6.8. Особенности износа и заточка фрез

Фрезы изнашиваются преимущественно по задней поверхности зубьев. Допустимый износ для цилиндрических фрез из быстрорежущей стали при черновой обработке стали – 0,4...0,6 мм, чугуна – 0,5...0,8 мм. Допустимый износ торцовых твердосплавных фрез – 1...1,2 мм при черновой обработке стали и 1,5...2 мм – чугуна.

При чистовом фрезеровании за критерий износа принимается такой износ, при котором шероховатость обработанной поверхности уже не удовлетворяет техническим требованиям. Период стойкости фрез, как правило, выбирается в интервале 60...400 мин в зависимости от конструкции и диаметра.

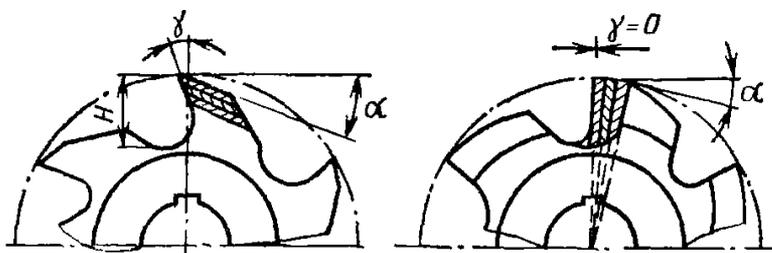


Рис. 3.41. Форма режущего зуба:
а – остро заточенных фрез; б – с затылованной задней поверхностью

По конструкции зуба (рис. 3.41) различают фрезы *с незатылованными* и *с затылованными зубьями*. Фрезы с незатылованными зубьями имеют переднюю и заднюю поверхности плоской формы, что упрощает изготовление фрез. К группе фрез с незатылованными зубьями относятся цилиндрические, торцовые, дисковые и др. Их заточку проводят, в основном, по задним поверхностям. Торцовые сборные фрезы затачивают по задним поверхностям в сборе. Применяют различные схемы заточки – *однооборотная* (заточка поочередно каждого зуба до полного удаления всего припуска), *многооборотная* (постепенное удаление припуска со всех зубьев инструмента). Недостаток незатылованной конструкции зуба – уменьшение высоты зуба после переточки по задней поверхности. У фрез с затылованными зубьями передняя поверхность – плоская, а задняя имеет форму архимедовой спирали. Они затачиваются по передней поверхности. Достоинством конструкции затылованного зуба является то, что при переточке по передней поверхности профиль режущей кромки сохраняется постоянным. Такая конструкция зуба применяется у фасонных фрез.

3.7. Протягивание

3.7.1. Общие сведения о протягивании. Конструктивные элементы протяжек и прошивок

Протягивание – это высокопроизводительный технологический способ обработки профильных отверстий и наружных поверхностей с помощью протяжек, прошивок и протяжных блоков. Протягивание обеспечивает получение поверхностей с малой шероховатостью ($Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм), а также размеров, соответствующих 6...8-му квалитетам точности.

Протягивание позволяет обработать за смену большое число заготовок, но только одного типоразмера. Поэтому обработка протягиванием рентабельна лишь в условиях крупносерийного и массового производства.

Протяжка – многозевый металлорежущий инструмент, имеющий при относительно малых поперечных размерах большую длину ($L > 1500$ мм), который используется для завершающей обработки (профилирования) сквозных отверстий, предварительно изготовленных сверлением. С помощью протяжек получают отверстия круглого, квадратного и шестигранного поперечного сечения, отверстия со шпоночным пазом, шлицевые и фасонные (рис. 3.42).

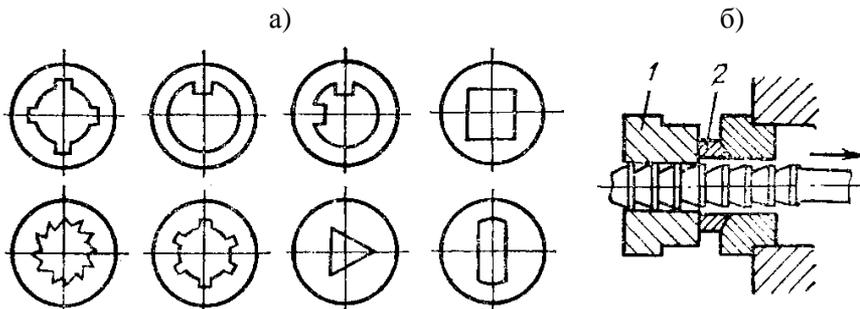


Рис. 3.42. Формы протягиваемых отверстий (а) и схема обработки детали (б)

На режущей части l_4 протяжки размещается большое число режущих зубьев, расположенных друг за другом (рис. 3.43). Каждый режущий зуб больше предшествующего на $0,01 \dots 0,03$ мм. Полуразность размеров последнего и первого зубьев равна припуску на обра-

ботку протягиванием. Кроме режущей части, протяжка имеет калибрующую часть $l_5 - 4...8$ зубьев одинакового диаметра, предназначенных для окончательной зачистки обработанной поверхности и служащих резервом при переточке протяжки; переднюю l_3 и заднюю l_6 направляющие для центрирования протяжки в обрабатываемом отверстии в начале и в конце резания (по форме или диаметру эти части соответствуют профилю предварительно обработанного или получаемого в результате протягивания отверстия); шейку l_2 и замковую часть l_1 , предназначенную для закрепления протяжки в патроне.

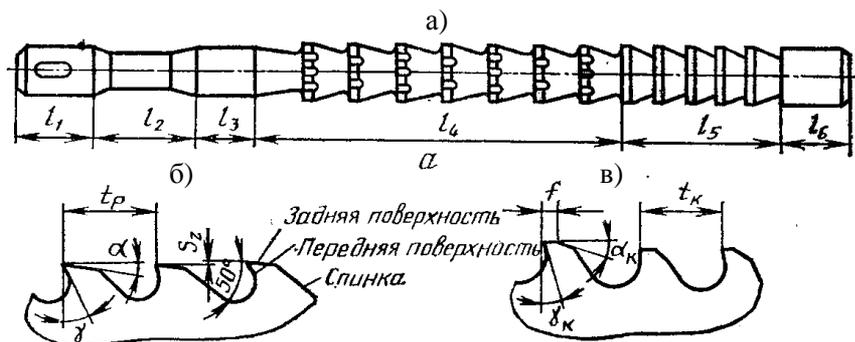


Рис. 3.43. Протяжка и её части:
а – общий вид протяжки; б, в – режущие и калибрующие зубья

В процессе резания протяжка с силой, приложенной тяговым патроном к замковой части, протягивается через неподвижную заготовку, установленную на опорном приспособлении стола протяжного станка. При этом в теле протяжки между замковой частью и зубом, выполняющим в данный момент срезание слоя металла с внутренней поверхности заготовки, действуют напряжения растяжения.

Общее число режущих зубьев протяжки определяется величиной припуска на обработку и толщиной среза. Впадины между зубьями служат для размещения образующейся стружки. Шаг режущих зубьев P выбирают в зависимости от длины протягиваемой детали $L_{дет}$ с учетом того, что в обрабатываемом отверстии должно работать не менее трех зубьев протяжки:

$$P = (1,25...1,5) \cdot \sqrt{L_{дет}} .$$

Передние и задние углы на зубьях протяжек измеряют в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке. Величина переднего угла устанавливается в зависимости от свойств обрабатываемого материала в пределах $5...20^\circ$. Чем выше вязкость металла, тем больше должен быть передний угол. На калибрующих зубьях $\gamma = 0...5^\circ$. В отличие от передних задние углы принимаются независимо от свойств обрабатываемого материала. Определяющим фактором является необходимость сохранения рабочих размеров зубьев при перетачивании. Для протяжек, обрабатывающих внутренние поверхности, $\alpha = 2...4^\circ$, обрабатывающих наружные поверхности, – $\alpha = 5...10^\circ$. На калибрующих зубьях $\alpha = 0^\circ 30'...2^\circ$.

Прошивка (рис. 3.44) – это инструмент меньшей, чем протяжка, длины. В процессе работы прошивка с силой проталкивается через предварительно изготовленные отверстия и, срезая оставленный на обработку припуск, изменяет их форму и размеры. Длина прошивок ограничена, т.к. они работают на сжатие, и при большой длине может произойти потеря устойчивости из-за продольного изгиба. Схема нагружения прошивок определяет их конструкцию, которая предусматривает наличие только режущей части l_4 и направляющей части – передней l_3 и задней l_6 .

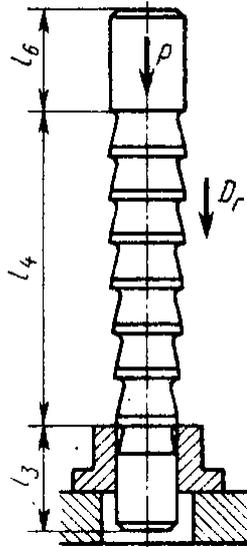


Рис. 3.44. Схема прошивки отверстия:
1 – прошивка; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – упорная втулка

Протяжными блоками называются комплекты протяжек призматической формы, предназначенные для обработки наружных поверхностей заготовок.

3.7.2. Элементы режима резания при протягивании

Главным движением резания при протягивании (прошивке) является прямолинейное движение протяжки (прошивки) в осевом направлении. Кинематическое исполнение протяжных станков в соответствии с принципиальной кинематической схемой резания предусматривает только прямолинейное возвратно-поступательное движение рабочих органов. Прямое поступательное движение всегда является рабочим ходом; возвратное – холостым ходом.

Скорость относительного прямолинейного рабочего движения, с которой протяжка перемещается вдоль обрабатываемой поверхности заготовок, является скоростью резания. Последняя при протягивании мала (менее 20 м/мин), что определяется необходимостью преодоления инерционных сил больших масс при реверсе и уменьшения ударной нагрузки при входе первого зуба режущей части в обрабатываемый материал. Наиболее применяемый диапазон значений скорости резания при протягивании $V = 1,5...15$ м/мин. На специальных протяжных станках для обработки корпусных деталей скорости резания могут достигать 90 м/мин.

Глубина резания при протягивании определяется длиной главного режущего лезвия. В общем случае глубина резания количественно равна проекции главного режущего лезвия на плоскость, перпендикулярную направлению главного движения, причем измерение в этой плоскости производится перпендикулярно направлению подачи.

Подача на зуб представляет собой разность по высоте двух соседних зубьев протяжки. При обработке стали и чугуна $S_3 = 0,01...0,03$ мм. Для протяжек, у которых режущие кромки перпендикулярны к направлению движения протяжки ($\varphi = 90^\circ$), подача на зуб и толщина среза совпадают (например, при протягивании круглыми протяжками). Ширина среза b равна длине или сумме длин режущих кромок. При $\varphi = 90^\circ$ ширина среза и глубина резания совпадают. Глубина резания при протягивании является величиной переменной.

3.7.3. Схемы резания при протягивании

Срезание припуска, оставленного под протягивание, может производиться зубьями протяжки в соответствии с различными схемами резания, определяемыми конструктивным исполнением зубьев. Под *схемой резания* понимается форма и последовательность срезания отдельных частей общего припуска зубьями протяжки. Различают следующие основные схемы резания:

- 1) профильную;
- 2) генераторную;
- 3) прогрессивную.

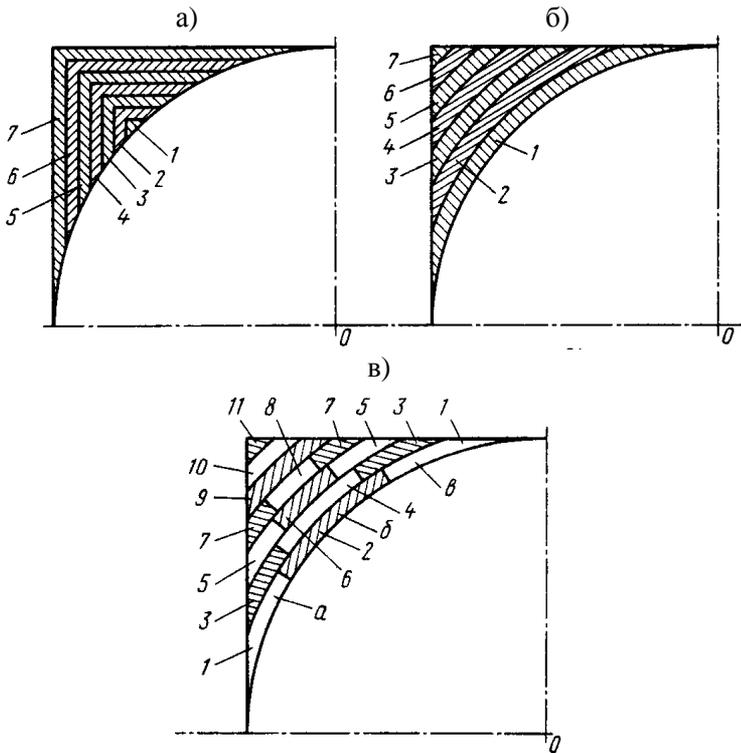


Рис. 3.45. Схемы резания при протягивании

Профильная схема резания (рис. 3.35 а) характеризуется тем, что профиль всех режущих зубьев протяжки соответствует конфи-

гурации обрабатываемой поверхности. В результате все зубья режущей части, за исключением последнего, выполняют предварительную обработку по формированию заданного профиля детали. Точность и качество обработанной поверхности детали определяются последним зубом режущей части. Основным недостатком профильной схемы резания является технологическая сложность изготовления профиля зубьев режущей части, поэтому ее применяют для протяжек, предназначенных для обработки поверхностей простейших форм (круглых, плоских).

При генераторной схеме резания (рис. 3.45 б) срезание припуска производят зубьями, имеющими переменный профиль, постепенно переходящий от прямолинейной или круглой формы к заданному на изделии профилю. Зубья протяжек, предназначенных для работы по генераторной схеме резания, легче изготавливать и перетачивать. Эта схема является самой простой и наиболее распространенной.

При прогрессивной схеме резания (рис. 3.45 в) срезание припуска производится не кольцевыми слоями по всему профилю, а разделяется на части так, что каждый зуб срезает слой металла только с части профиля. Остающаяся часть профиля срезается другими зубьями протяжки того же диаметра, что и первый режущий зуб. Зубья одинакового диаметра, срезающие каждый свой участок профиля на глубину подачи, образуют секцию, количество зубьев в которой – от 2 до 5. Это позволяет распределить нагрузку, приходящуюся на зубья протяжки, равномерно вдоль всей длины режущей части, но ведет к увеличению необходимого числа режущих зубьев. Использование данной схемы ведет к увеличению общей длины протяжки, а также усложняет технологию изготовления и заточки режущих зубьев.

Износ зубьев протяжек и прошивок происходит преимущественно по задним поверхностям со скруглением режущих кромок. Зубья протяжек (прошивок) для обработки внутренних поверхностей затачиваются по передней поверхности, а для обработки наружных поверхностей и шпоночных пазов - по задним.

3.7.4. Сила и мощность резания при протягивании

Сила резания при протягивании складывается из сил, приложенных одновременно ко всем участвующим в резании зубьям. Суммарную силу резания для всех одновременно работающих зубьев

обозначают P_z . Ее величина зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, ширины и толщины срезаемого слоя, геометрических параметров зуба протяжки, условий обработки. Для протяжек с прямыми зубьями сила резания P_z может быть подсчитана по формулам:

при работе шпоночными и шлицевыми протяжками

$$P_z = 10 \cdot C_p^1 \cdot S_z^y \cdot b \cdot z \cdot n \cdot K_h \cdot K_{жс} \cdot K_a \cdot K_\gamma, \text{ Н};$$

при работе круглыми протяжками

$$P_z = 10 \cdot C_p^2 \cdot S^y \cdot D \cdot z \cdot K_h \cdot K_{жс} \cdot K_a \cdot K_\gamma, \text{ Н};$$

где C_p^1 и C_p^2 – коэффициенты, характеризующие материал заготовки;

S_z – подача на зуб, мм;

b – ширина шпонки или шлица, мм;

z – максимальное число одновременно работающих зубьев протяжки;

D – диаметр отверстия, мм;

n – число шлицев;

y – показатель степени;

$K_h, K_{жс}, K_a, K_\gamma$ – коэффициенты.

Мощность, необходимая для протягивания, рассчитывается по формуле

$$N = \frac{P_z \cdot V}{6120}, \text{ кВт.}$$

3.7.5. Расчет основного времени при протягивании

Основное время затрачиваемое на рабочий ход протяжки, равно

$$T_0 = \frac{L_{прот}}{1000 \cdot V}, \text{ мин.},$$

где $L_{прот}$ – общий путь рабочего хода протяжки, мм;

V – скорость протягивания, м/мин.

Длина общего пути рабочего хода протяжки рассчитывается из условия, что завершение протягивания происходит в тот момент, когда протяжка целиком, включая заднюю направляющую, пройдет через отверстие предметного стола протяжного станка. Следовательно, минимальная длина общего пути рабочего хода равна

$$L_{\text{прот}} = \Delta l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6,$$

где Δl_1 – конечный перебег, $\Delta l_1 = 5 \dots 10$ мм;

l_2, l_3, l_4, l_5, l_6 – конструктивные элементы протяжки (рис. 3.43).

При наружном протягивании, когда на протяжке отсутствуют такие элементы, как шейка и направляющие,

$$L_{\text{прот}} = l_4 + \Delta l_1 + l_3 + \Delta l_2,$$

где $\Delta l_1, \Delta l_2 = 5 \dots 10$ мм;

l_3 – длина заготовки, мм.

Основное время, затрачиваемое на обработку заготовки с учетом холостого хода протяжки, рассчитывается по формуле

$$T_0 = \frac{(1 + K_y) \cdot l}{1000 \cdot K_y \cdot V},$$

где $K_y = 1,2 \dots 1,25$ – коэффициент ускорения обратного хода;

l – длина двойного хода, мм.

3.8. зубонарезание

3.8.1. Сущность методов нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес

Современные механизмы, приборы и машины трудно представить без **зубчатых колес**, которые являются основным звеном зубчатых передач. **Зубчатые передачи** применяют для передачи вращательного движения между параллельными, пересекающимися и скрещивающимися осями валов, а также для преобразования вра-

щательного движения в поступательное. Высокий коэффициент полезного действия (он колеблется в пределах 50...99,5%), компактность конструкции, плавность работы, высокая точность, возможность передавать силы практически под любым углом с большим диапазоном скоростей и передаточных чисел способствовали широкому распространению зубчатых передач в автомобилях, тракторах, станках и других механизмах и машинах. Основные характеристики некоторых зубчатых передач приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Основные характеристики некоторых зубчатых передач

Тип зубчатого колеса	КПД	Предел изменения передаточного числа	Наибольшая окружная скорость передачи	
			высокой точности	общего назначения
Прямозубые цилиндрические внешнего или внутреннего зацепления	97...99,5	1:1...5:1	100	20
	97...99,5	1:1...7:1	100	20
Червячные с цилиндрическим червяком	50-90	1:1...100:1	50	25

Зубчатые колеса бывают *цилиндрические, конические, червячные*. Наиболее широко в машиностроении и станкостроении используются цилиндрические зубчатые колеса. По форме зубьев они делятся на *прямозубые, косозубые и шевронные*. Рассматриваемые в данном разделе методы изготовления цилиндрических зубчатых колес справедливы и для изготовления других видов зубчатых колес.

Зубья колес могут быть выполнены с различной формой профиля, – *эвольвентной, циклоидной, образованной дугами окружности* (зацепление Новикова). Большинство зубчатых колес (практически – все) имеют эвольвентный профиль, разработанный профессором Петербургской академии Леонардом Эйлером в 1795 году.

Одной из основных характеристик зубчатого колеса является *модуль* (m) – отношение шага зацепления зубчатого колеса к числу π . Зубчатые колеса с модулем до 1 мм называют *мелкомодульными*, от 1 до 10 мм – *среднемодульными*, выше 10 мм – *крупномодульными*.

В соответствии с ГОСТ 1643-81, предусмотрено изготовление зубчатых колес **12-ти степеней точности** (не путать с квалитетами точности): минимальная точность – 12-я степень, максимальная – 1-я степень. Каждая степень точности разделена на **3 нормы точности**: кинематическая точность; плавность работы; норма контакта зубьев колес. В тракторах и большинстве автомобилей применяют зубчатые колеса 7...9-й степеней точности.

Зубчатые колеса имеют сложную фасонную поверхность; методы их обработки отличаются от методов обработки деталей типа тел вращения и плоских поверхностей, рассмотренных ранее. Производство зубчатых колес – трудоемкий и сложный процесс. Основное (машинное) время, затрачиваемое на обработку зубчатого колеса, на 60...80% состоит из времени, затрачиваемого на зубонарезание. Высокое качество зубчатого колеса и экономичность его изготовления формируется на всех этапах производства, начиная с проектирования и кончая изготовлением. Процесс нарезания зубьев зубчатых колес состоит из черного и чистового нарезания и отделки зубьев. Зубчатые колеса малых модулей ($m < 3$ мм) нарезают за 1 проход, крупных модулей ($m > 6$ мм) – за 2...3 прохода.

Нарезание зубчатых колес производится методом копирования или методом обкатки (огибания). Большинство зубообрабатывающих станков работают по методу огибания.

Метод копирования. При нарезании зубчатых колес этим методом каждая впадина между зубьями обрабатывается инструментом, имеющим форму, полностью соответствующую профилю впадины зубчатого колеса (рис. 3.46). Во время обработки деталь не имеет вращения, а по окончании обработки каждого зуба поворачивается на угол, равный $2 \cdot \pi / z$, где z – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса.

Для нарезания зубчатых колес этим методом используют дисковые и пальцевые фасонные (модульные) фрезы. Обработку проводят на универсальных фрезерных станках с применением делительных головок.

Для получения точного профиля зуба зубчатого колеса с заданным числом зубьев и модулем применяются комплекты дисковых (пальцевых) модульных фрез из 8 шт., а для более точного нарезания – из 15 или 26 шт. (т.е., кроме деления по модулям, фрезы для нарезания зубьев зубчатых колес делят по номерам). Каждая фреза из набора предназначена для обработки зубчатых колес с опреде-

ленным числом зубьев; при этом расчет размеров фрезы производят по минимально допустимому числу нарезаемых зубьев.

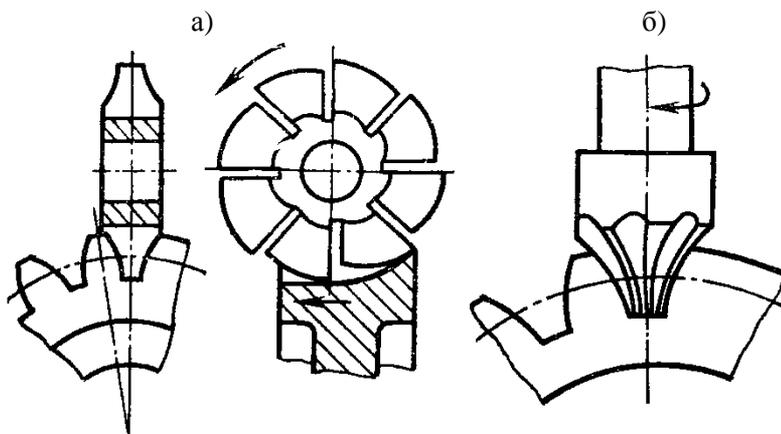


Рис. 3.46. Схемы обработки зубьев по методу копирования:
а – дисковой модульной фрезой; б – пальцевой модульной фрезой

Таблица 3.4

Деление дисковых модульных фрез по номерам
(набор из 8 фрез)

№ фрезы	1	2	3	4	5	6	7	8
Число нарезаемых зубьев зубчатого колеса	12...13	14...16	17...20	21...25	26...34	35...54	55...134	135 и более

Точность нарезания методом копирования соответствует 8...10-й степени точности, шероховатость обработанной поверхности $Ra = 3,5...5$ мкм.

Все вышеизложенное справедливо для пальцевых модульных фрез, применяемых для нарезания зубчатых колес с модулем более 10 мм и шевронных зубчатых колес.

Метод копирования применяется, в основном, в единичном и мелкосерийном производствах из-за следующих недостатков: относительно малой точности изготовления зубчатых колес; малой производительности; сложности изготовления рабочего инструмента.

Метод обкатки (огибания). При нарезании зубчатых колес по этому методу инструмент и заготовка нарезаемого зубчатого колеса имеют такие движения, какие они имели бы, находясь в действительном зацеплении (например: зубчатое колесо – зубчатая рейка; пара зубчатых колес, червяк – червячное колесо). Профиль впадины между зубьями формируется постепенно в процессе обкатки заготовки зубчатого колеса зуборезным инструментом – червячными фрезами, долбяками для нарезания конических зубчатых колес, резцами (рис. 3.47).

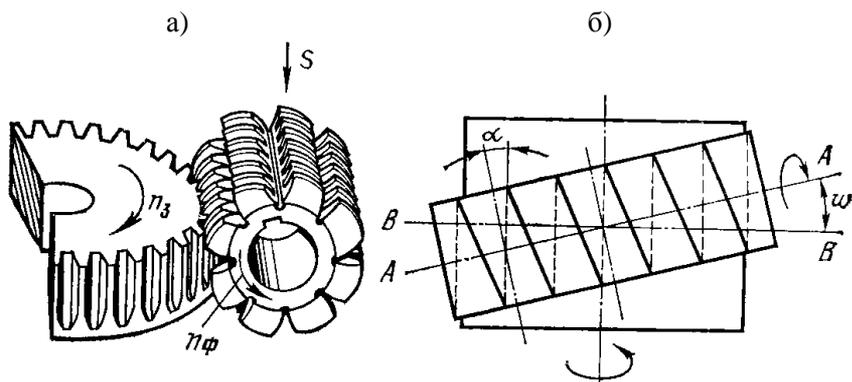


Рис. 3.47. Схема нарезания зубчатых колес червячной фрезой

Обработку заготовок данным методом проводят на специализированных металлорежущих станках, которые, как правило, имеют большую мощность электродвигателя цепи главного движения (порядка 1,8...2,5 кВт на модуль) и предусматривают возможность полной автоматизации (например, зуборезный полуавтомат 5Д32, где осуществляется зубофрезерование червячными фрезами методом копирования).

При зубофрезеровании кинематика станка позволяет осуществлять следующие движения (рис. 3.47):

- 1) резания (главное движение – вращение фрезы);
- 2) обкатки (вращение заготовки, согласованное с вращением фрезы);
- 3) подачи (перемещение суппорта с фрезой вдоль оси заготовки);
- 4) дополнительное (вращение заготовки, согласованное с движением подачи – в случае нарезания косозубых зубчатых колес).

Зубонарезание червячными модульными фрезами является самым распространенным и производительным методом формообразования цилиндрических зубчатых колес. При зубофрезеровании методом обкатки обеспечивается 7...9-я степень точности. Для нарезания колес 7-й степени точности применяются червячные модульные фрезы класса точности АА, для 8-го и 9-го классов точности – А и В соответственно. Шероховатость обработанной поверхности $Ra = 3,5...5$ мкм.

При фрезеровании цилиндрических зубчатых колес фрезу располагают под углом ω к торцу заготовки, равным углу наклона спирали фрезы α . Для увеличения производительности обработки применяют сборные червячные фрезы с увеличенным диаметром посадочного отверстия, благодаря чему можно работать с повышенными режимами резания, а также проводить нарезание зубчатых колес пакетом (одновременное нарезание нескольких зубчатых колес на одной оправке).

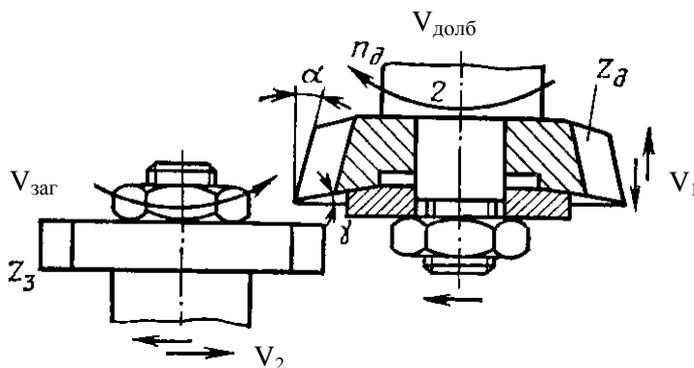


Рис. 3.48. Схема нарезания зубчатого колеса долбяком

При зубодолблении кинематическая схема резания объединяет следующие движения (рис. 3.48):

- 1) V_1 – возвратно-поступательное движение долбяка (главное движение резания);
- 2) $V_{\text{долб}}$, $V_{\text{заг}}$ – согласованное вращение долбяка и заготовки (движение обката);
- 3) V_2 – возвратно-поступательное движение заготовки в начале и в конце обратного хода (дополнительное движение).

Число переходов при зубодолблении зависит от модуля, материала и точности нарезаемого зубчатого колеса. Зубчатые колеса с модулем 2...3 мм обрабатывают за два перехода с одной установки (предварительный и чистовой), а с модулем 3...6 мм - за три перехода (два предварительных и чистовой).

В качестве зуборезного инструмента при долблении используются долбяки, выполняемые в форме зубчатого колеса, у которых зубья превращены в режущие лезвия. Зуборезные долбяки изготавливают 3-х классов точности: АА, А, В – для нарезания зубчатых колес 6...8-й степеней точности на зубодолбежных станках. Современные зубодолбежные станки имеют жесткую конструкцию, работают с частотой до 2500 дв. ход./мин, удобны для автоматизации. При нарезании зубьев зубчатого колеса методом обкатки круглыми долбяками повышается точность обработки (в сравнении с зубофрезерованием).

Метод обкатки применяется в массовом и крупносерийном производствах и характеризуется высокими производительностью и точностью получения изделий, а также возможностью нарезания колес с различным числом зубьев одного модуля одним и тем же инструментом. В сравнении с зубофрезерованием метод обкатки круглыми долбяками более универсален, чем обкатка червячными фрезами. Точность обработки при зубодолблении – выше, однако в условиях крупносерийного и массового производств стоит применять зубофрезерование червячными фрезами, так как нет потерь на обратный ход инструмента. Зубодолбление незаменимо при нарезании блочных зубчатых колес с близкорасположенными венцами, зубчатых реек, шевронных зубчатых колес (в том числе без канавки между зубьями), а также зубчатых колес внутреннего зацепления с прямым и косым зубом.

3.8.2. Назначение режимов резания и расчет основного времени

Скорость резания при зубофрезеровании V (в м/мин) определяется, как при обычном цилиндрическом фрезеровании.

Подача задается перемещением фрезы (в мм) за один оборот заготовки S_0 . Подача за один оборот фрезы связана с подачей за один оборот заготовки соотношением

$$S_{фр} = S_0 \cdot \frac{K}{z}, \text{ мм/об,}$$

где K – число заходов червячной фрезы;

z – число зубьев нарезаемого колеса.

При увеличении числа заходов K возрастает подача на один оборот нарезаемого зубчатого колеса.

Скорость резания дисковыми и концевыми фрезами составляет 15...30 м/мин. При этом продольная подача на оборот фрезы при работе дисковыми фрезами выше ($S_{фр} = 1...2,5$ мм на оборот фрезы), чем концевыми (пальцевыми) фрезами ($S_{фр} = 0,06...0,25$ мм на оборот фрезы). Нарезание зубчатых колес червячными фрезами – более производительный процесс. Подачу при черновом нарезании зубьев принимают $S_0 = 0,7...8$ мм за один оборот заготовки, при чистовом – 0,3...2,0 мм/об. Для чугунных заготовок подача может быть увеличена на 20 %. Для фрез из быстрорежущей стали скорость резания составляет 15...50 м/мин.

Глубина резания t (в мм) при зубофрезеровании равна глубине впадины зубьев нарезаемого колеса, если колесо нарезается за один проход. Когда число проходов увеличивается, глубина резания за каждый проход соответственно изменяется: например, при фрезеровании за два прохода общая глубина резания $t = 2,2$ мм разбивается на $t = 1,4$ мм при черновой обработке и $t = 0,8$ мм – при чистовой.

Основное время при зубофрезеровании цилиндрических зубчатых колес подсчитывают по формуле

$$T_0 = \frac{L \cdot z \cdot i}{n \cdot S_0 \cdot K},$$

где $L = q \cdot b + l_1 + l_2$, мм, – общий путь, проходимый фрезой в направлении подачи;

b – ширина венца нарезаемого колеса, мм;

q – количество одновременно нарезаемых колес;

l_1 – путь врезания,

$$l_1 = \frac{\sqrt{t \cdot (D - t)}}{\cos \omega}, \text{ мм,}$$

где D – диаметр фрезы, мм;

ω – угол установки фрезы на станке при нарезании прямозубого колеса);

l_2 – перебег, $l_2 = 2 \dots 5$ мм.

При долблении скорость резания (скорость движения долбяка) подсчитывают по формуле

$$V = \frac{2 \cdot L \cdot n}{1000},$$

где L – длина хода долбяка, мм;

n – число двойных ходов долбяка в минуту.

Скорость резания долбяка из быстрорежущей стали составляет 20...50 м/мин; круговая подача долбяка – 0,15...0,5 мм/дв.ход.

Основное время при зубодолблении состоит из времени врезания на требуемую глубину и времени обката и определяется по формуле

$$T_0 = \frac{h}{n \cdot S_p} + \frac{\pi \cdot m \cdot z}{n \cdot S} \cdot i, \text{ мин.}$$

где h – высота зуба, мм;

n – число двойных ходов долбяка в минуту;

S_p – радиальная подача при врезании на полную глубину резания, мм/дв.ход долбяка (обычно $S_p = 0,1 \dots 0,3$);

m, z – модуль, мм, и число зубьев нарезаемого колеса;

S – круговая подача, мм/дв.ход долбяка;

i – число проходов долбяка, зависящее от величины модуля.

3.8.3. Износ и заточка зуборезного инструмента

Характер износа зуборезного инструмента несколько отличается от износа токарного резца (рис. 3.49). Наибольшему изнашиванию подвергается задняя поверхность в зоне сопряжения задней и боковой поверхностями непосредственно по радиусу закругления. На боковых поверхностях может иметь место выкрашивание. Критерием затупления зуборезных инструментов при черновом нарезании зубчатых колес является износ по задней поверхности в пределах 0,8...1,2 мм. При чистовых операциях нарезания зубьев износ ре-

жущих инструментов незначителен и оценивается по величине шероховатости обработанной поверхности зубчатых колес.

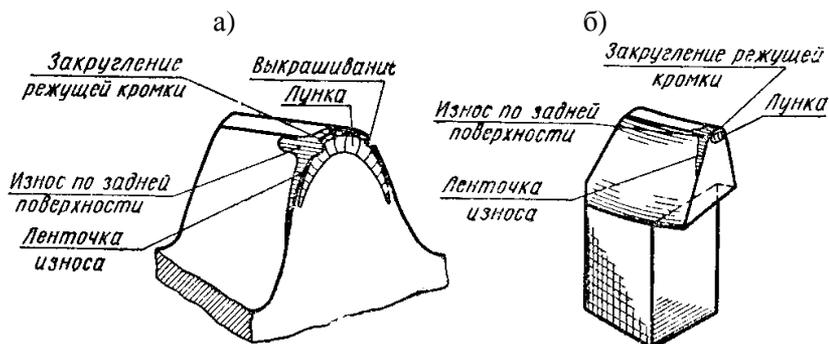


Рис. 3.49. Виды износа:

а – зуба червячной фрезы; б – наружного резца резцовой головки

Заточка режущих лезвий червячных фрез выполняется только по передней поверхности. Сохранение при этом геометрических параметров режущей части обеспечивается затылованием зубьев фрезы по спирали Архимеда при их изготовлении.

Зуборезные инструменты относятся к числу наиболее сложных и дорогостоящих. При их эксплуатации необходимо учитывать углы заточки, оказывающие непосредственное влияние на процесс стружкообразования, силы резания и износ инструмента (рис. 3.50).

Передний угол оказывает непосредственное влияние на пластическую деформацию стружки в процессе резания. С увеличением переднего угла уменьшается усадка стружки и улучшается ее сход с поверхности зуба фрезы. Однако применение червячных фрез с передним углом, отличным от нуля, требует дополнительной коррекции профиля режущей части фрезы. Чистовые червячные фрезы обычно выполняются с передним углом, равным нулю. У черновых и многозаходных червячных фрез для облегчения условий резания в ряде случаев передний угол выполняется в пределах $3...7^\circ$.

Задний угол по вершине, как правило, составляет $5...18^\circ$. Малые задние углы применяются для обработки очень хрупких материалов и материалов с высокой прочностью; большие – при обработке вязких материалов. Чрезмерное увеличение задних углов приводит к уменьшению угла заострения, что снижает теплоотвод от режущей кромки и срок службы фрезы.

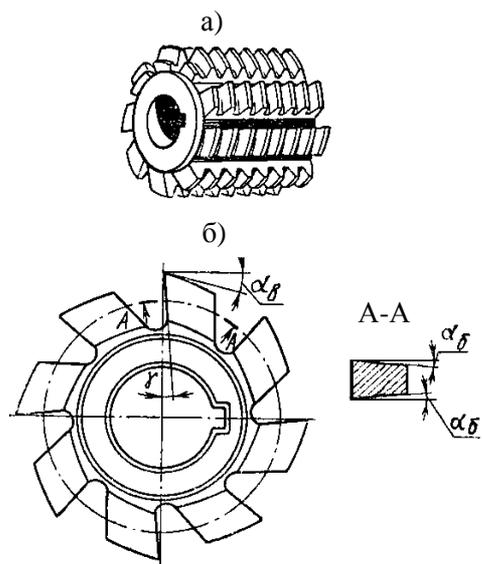


Рис. 3.50. Червячная фреза:
а – общий вид фрезы; б – углы режущей части

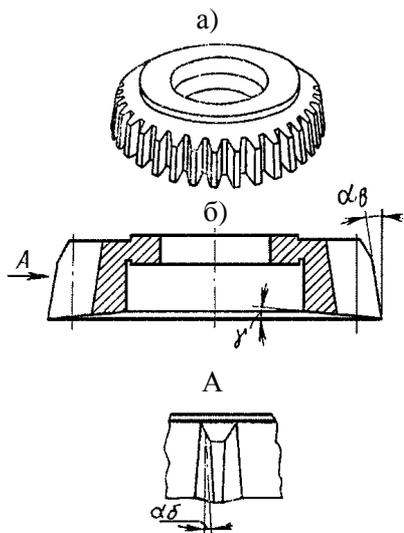


Рис. 3.51. Зуборезный долбяк:
а – общий вид долбяка; б – углы режущей части

Зуборезные долбяки, работающие методом обката, относят также к затылованным инструментам (рис. 3.51). Передний угол этих долбяков обычно равен 5° , задний по вершине составляет $3...8^\circ$. С увеличением этого угла резко уменьшается толщина зуба, что способствует сокращению количества возможных переточек долбяка.

3.9. Резьбонарезание

3.9.1. Основные методы нарезания крепежной резьбы

Основными методами изготовления крепежных резьб резанием являются:

- 1) нарезание резьбы на токарных станках резьбовыми резцами и гребенками ($Ra = 3,2...1,25$ мкм);
- 2) нарезание метчиками ($Ra = 3,2...6,3$ мкм), плашками ($Ra = 2,5...12,5$ мкм) и резьбонарезными головками ($Ra = 2,5...3,2$ мкм);
- 3) фрезерование резьбы ($Ra = 2,5...6,3$ мкм).

Выбор способа получения крепежной резьбы зависит от размеров нарезаемой резьбы, требуемой точности и шероховатости обработанной поверхности, формы, размеров и материала заготовки, типа производства.

Резьбонарезными резцами нарезают внутренние и наружные резьбы в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также при проведении ремонтных работ.

Круглыми плашками, метчиками и резьбонарезными головками нарезают внутренние и наружные резьбы на болтах, винтах, шпильках, гайках и деталях машин в условиях крупносерийного и массового производства.

Резьбовыми фрезами обрабатывают наружные и внутренние резьбы на деталях машин, в частности, на валах, когда использование других видов резьбонарезного инструмента невозможно или нерентабельно.

Характерная особенность резьбонарезания состоит в том, что наряду со срезанием припуска режущий инструмент должен обеспечивать точность формы заданного профиля резьбы, который характеризуется шагом P , наружным D , средним D_2 и внутренним D_1 диаметрами. Поэтому в основу резьбонарезания положены более сложные принципиальные кинематические схемы резания, чем при рассмотренных ранее технологических способах обработки металлов.

3.9.2. Нарезание резьбы резьбовыми резцами

Для нарезания резьбы с неискаженным профилем главная режущая кромка резьбового резца должна целиком лежать в плоскости (обычно горизонтальной), проходящей через ось вращения заготовки, и располагаться строго симметрично относительно плоскости, перпендикулярной оси обрабатываемой заготовки, что достигается применением установочных шаблонов.

Нарезание резьбы ведется на токарно-винторезных станках за несколько проходов в связи с тем, что вершина резца, формирующая впадину резьбового профиля, в процессе резания находится в тяжелых условиях нагружения, и ее прочность оказывается недостаточной при нарезании резьбы сразу на всю глубину профиля. Резьбы с малыми шагами ($P \leq 1$ мм) нарезают профильными резьбовыми резцами, со средними и крупными шагами ($P > 1$ мм) – комплектом резцов, состоящим из предварительного резца, вырезающего основную часть припуска, и профильного чистового резца, окончательно формирующего профиль резьбовых витков.

Резьбы с шагом до 2 мм нарезаются по следующей схеме (рис. 3.52 а). После каждого прохода резец отводят в исходное положение и по нониусу ходового винта поперечной подачи устанавливают глубину резания, которая равна поперечной подаче, и повторяют проход:

$$S_{\text{поп}} = H / i,$$

где H – высота нарезаемого резьбового профиля;

i – число рабочих ходов.

Величина $S_{\text{поп}}$ находится в пределах 0,05...0,2 мм на проход. Продольная подача равна шагу нарезаемой резьбы; главное движение – вращение заготовки.

У профильного резьбового резца в резании и профилировании нарезаемой резьбы участвуют три режущие кромки: на лезвии вершины резца, на левом и на правом прямолинейных профилях лезвия резца. Все они являются главными; вспомогательных режущих кромок резьбовые резцы не имеют.

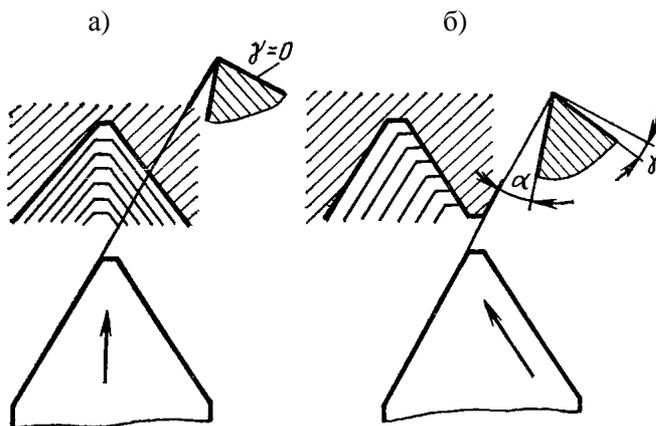


Рис. 3.52. Схемы установок резца при нарезании резьбы

Главный угол в плане φ на правой и левой боковых главных режущих кромках равен половине величины угла при вершине нарезаемого резьбового профиля (для метрической резьбы $\alpha_0 = 60^\circ$). На режущей кромке лезвия вершины главный угол в плане равен 90° .

Угол наклона главных режущих кромок и передний угол профильных резьбонарезных резцов равны нулю. Задний угол на лезвии вершины резца α назначается в пределах $8...10^\circ$. На левой и правой профильных сторонах задний угол α_6 может быть выражен через значение заднего угла α :

$$\operatorname{tg} \alpha_6 = \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \alpha_0 / 2.$$

На лезвии вершины резца главный угол в плане равен 90° , поэтому наибольшая толщина срезаемого слоя $a = S_{\text{поп}}$. На левом и правом боковых профильных главных лезвиях главный угол в плане $\varphi = \alpha_0 / 2$, толщина срезаемого слоя

$$\alpha_6 = S_{\text{поп}} \cdot \sin \alpha_0 / 2.$$

Для нарезания качественной резьбы толщина срезаемого слоя за один проход резца $0,02 \text{ мм} < a < 0,2 \text{ мм}$. Кроме того, процесс резьбонарезания должен вестись с применением смазывающе-охлаждающих жидкостей на масляной основе.

Чтобы облегчить условия резания при нарезании резьб с шагом более 2 мм, обработку ведут последовательно двумя резцами. Сначала основную часть припуска на образование резьбового витка срезают черновым резьбовым резцом, затем ведут окончательную обработку и профилирование резьбового витка чистовым профильным резьбовым резцом.

Схема последовательного срезания припуска черновым резьбовым резцом показана на рис. 3.52 б. Нарезание резьбы идет с подачей резца вдоль одной из сторон профиля резьбы, что облегчает условия образования и отвода стружки. При постоянной подаче на каждый проход черновой резьбовой резец срезает слои все большей площади поперечного сечения, поэтому лучше применять переменную подачу, причем во время 2...3-х первых проходов резание может осуществляться с большей подачей, и нарезание резьбы будет выполнено за меньшее их число.

Черновой резьбовой резец имеет односторонне расположенную и состоящую из двух отрезков главную режущую кромку; при этом участок на вершине резца может быть как прямым, так и криволинейным. Выполняя основную работу резания, лезвия вершины и левой боковой стороны черного резьбового резца являются главными лезвиями. На правой боковой профильной стороне у черного резьбового резца имеется вспомогательное лезвие, которое участвует в срезании слоя припуска на длине, равной подаче на один проход.

На режущей кромке вершины резца главный угол в плане

$$\varphi = 90^\circ + \alpha_0 / 2;$$

на левой боковой режущей кромке $\varphi = \alpha_0$. Чтобы уменьшить трение вспомогательной задней поверхности резца по поверхности нарезаемой резьбы, вспомогательная режущая кромка затачивается под вспомогательным углом в плане 2...5°. Таким образом, угол профиля черного резьбового резца меньше, чем чистового, и равен $\alpha_0 - \varphi_1$. У черновых резьбовых резцов $\gamma = 15...20^\circ$; $\alpha = 8...10^\circ$; угол наклона главных режущих кромок равен нулю.

3.9.3. Нарезание резьбы резьбовыми гребенками, метчиками, плашками и резьбовыми головками

В отличие от токарных резьбовых резцов, нарезающих полный резьбовой профиль за несколько рабочих проходов, инструменты

этой группы нарезают резьбу полного профиля за один проход одним или несколькими резьбовыми гребенчатыми режущими профилями, расположенными на их рабочей части.

Резьбовые гребенки (рис. 3.53) представляют собой объединение нескольких резьбовых резцов с профилем, соответствующим профилю нарезаемой резьбы. Первые два резца, срезанные под углом $\varphi = 25...30^\circ$, образуют режущую (заборную), остальные – калибрующую часть. Гребенка обеспечивает более равномерную нагрузку между резцами (витками гребенки) и требует меньшего количества проходов при нарезании резьбы, что существенно повышает производительность процесса.

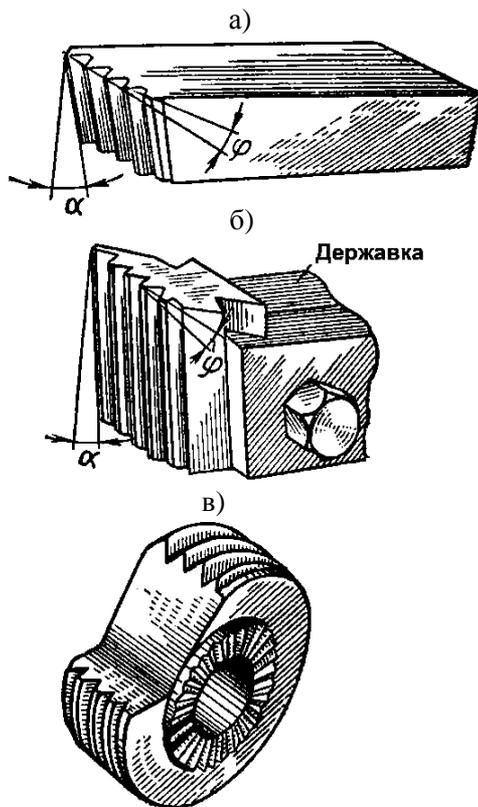


Рис. 3.53. Резьбовые гребенки:
а – стержневая; б – призматическая; в – круглая

Резьбовые гребенки жестко крепятся в державках на суппорте станка так, чтобы режущий гребенчатый профиль располагался в плоскости, проходящей через ось вращения заготовки ($\gamma = 0$).

Перемещение резьбовой гребенки подобно перемещению профильного резьбового резца. Отличие лишь в том, что одно перемещение гребенки обеспечивает нарезание резьбы полного профиля и необходимого диаметра за один рабочий ход. Применение резьбовых гребенок возможно только в случае, если конфигурация обрабатываемой детали позволяет свободный ее подход в исходное положение и свободный выход после рабочего прохода.

На **метчиках** имеется несколько (3...4) режущих гребенчатых профилей, образованных разделением сплошной резьбовой поверхности продольными канавками. Метчики предназначены для нарезания или калибрования резьбы в отверстиях и представляют собой винты с продольными (прямыми или винтовыми) канавками.

По конструкции и применению различают следующие основные типы метчиков: ручные – для нарезания резьбы вручную, машинные – для нарезания резьбы на станках; гаечные – для нарезания гаек; плашечные – для нарезания и калибрования резьбы в плашках. Промышленность выпускает ручные метчики двух- и трехкомплектные. Черновой метчик снимает 60 % материала, средний – 30, чистовой – 10. При этом черновой и средний метчики имеют меньшие наружный и средний диаметры, а чистовой имеет полный профиль резьбы. Гаечные метчики применяют на станках для нарезания резьбы в гайках; их выполняют с коротким, длинным и изогнутым хвостиком.

На рис. 3.54 а показаны части и конструктивные элементы метчика. Рабочая часть метчика l состоит из заборной части l_1 и калибрующей l_2 ; заборная (режущая) часть выполняет основную работу по нарезанию резьбы. Для ручных метчиков длину заборной части принимают: у чернового – 4 витка; у чистового – 1,5...2 витка. У машинных метчиков длина заборной части при нарезании сквозных отверстий составляет 5...6 витков, при нарезании глухих отверстий – 2 витка; у гаечных – 11...12 витков.

Калибрующая часть l_2 служит для зачистки и калибрования резьбы и обеспечения правильного направления. Для уменьшения трения калибрующая часть имеет незначительный обратный конус. Хвостовая часть метчика l_3 представляет собой стержень. Конец

хвостика 4 у ручных, а иногда и машинных метчиков, имеет форму квадрата. Профиль канавки метчика оказывает влияние на процесс нарезания резьбы и должен удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать достаточное пространство для стружки; препятствовать резанию во время обратного вывертывания метчика; способствовать отводу стружки в процессе резания и обеспечивать производительное резание. Широкое распространение получили трех-пятиканавочные метчики.

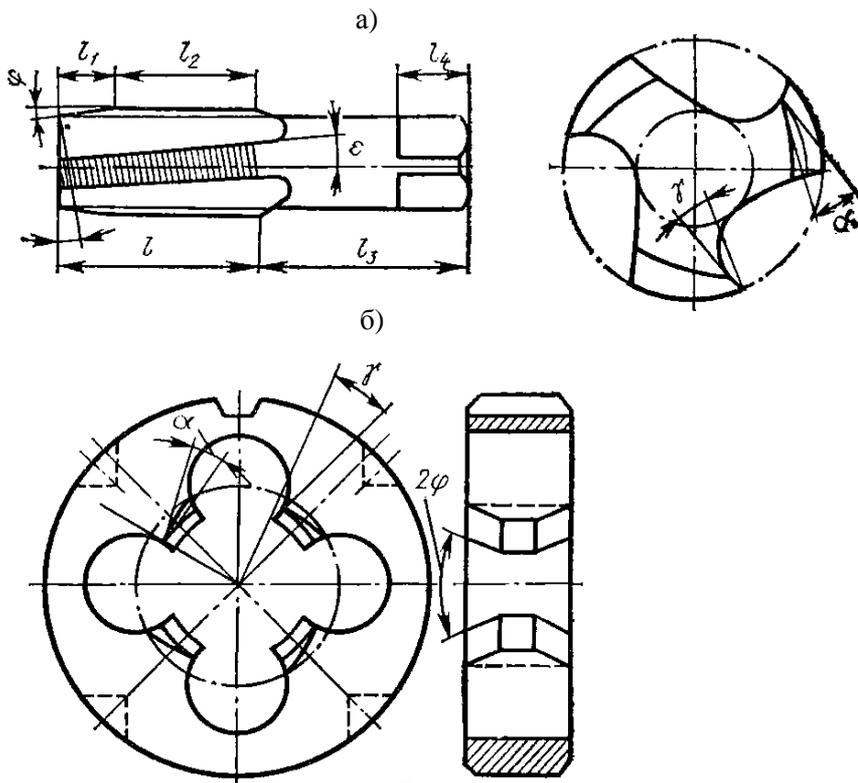


Рис. 3.54. Конструктивные элементы метчика (а) и плашки (б)

Передний угол γ метчика выбирают в зависимости от обрабатываемого материала: $5...10^\circ$ – для обработки стали; $0...5^\circ$ – для обработки чугуна и $10...25^\circ$ – для обработки цветных металлов и сплавов. С увеличением переднего угла улучшаются условия резания.

Задний угол α получают путем затылования режущей (заборной) части по наружному диаметру; его принимают в пределах $4...12^\circ$.

Обычно метчики изготавливаются с прямыми канавками, но для лучшего отвода стружки канавки метчиков изготавливают и винтовыми с углом наклона $\omega = 8...15^\circ$.

Плашки применяются для нарезания или калибрования наружных резьб за один проход; они бывают круглые, квадратные, шестигранные. Наиболее широкое применение имеют круглые плашки для нарезания резьбы диаметром до 52 мм.

На рис. 3.54 б изображены части и конструктивные элементы круглой плашки, представляющей собой закаленную гайку с режущими кромками и 3...5 отверстиями для отвода стружки. По толщине плашка имеет 8...10 витков; режущая часть выполняется в виде внутреннего конуса. Заборная часть имеет 2...3 витка. Угол 2ϕ выбирают в пределах $40...60^\circ$; при нарезании резьбы до упора $2\phi = 90^\circ$. Передний угол образуется в результате сверления стружечных окон (у стандартных плашек $\gamma = 15...20^\circ$); задний угол α выполняется только на заборной (режущей) части затылованием по архимедовой спирали (у стандартных плашек задний угол $\alpha = 6...8^\circ$).

На **резьбонарезной головке** (рис. 3.55) в общем корпусе смонтированы четыре круглые резьбовые гребенки, каждая из которых имеет по одному режущему профилю.

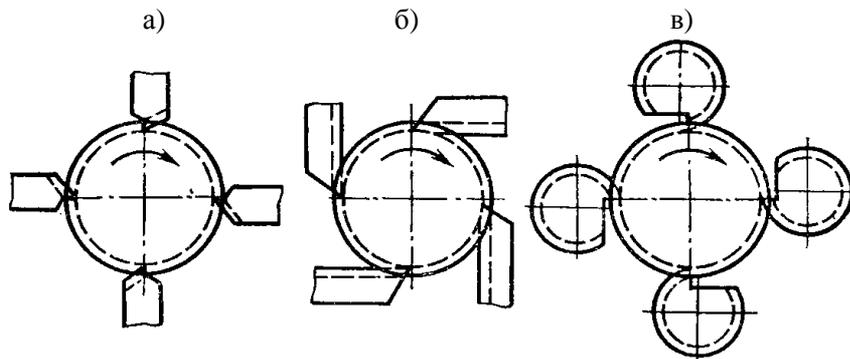


Рис. 3.55. Схема работы плашек нарезных головок

Метчики, круглые плашки и резьбонарезные головки получают только вращательное движение и необходимый для преодоления сил резания крутящий момент. Жесткого осевого и радиального ба-

зирования инструментов нет. На протяжении 2...3-х первых оборотов резьбонарезные инструменты поджимаются к заготовке в осевом направлении; за это время режущие зубья начальных витков режущей части нарезают на поверхности заготовки 2...3 витка резьбы неполного профиля. Боковые поверхности режущих зубьев, находясь в контакте с боковыми сторонами нарезаемых резьбовых витков, образуют кинематическую пару типа ходовой винт – гайка, обеспечивающую соосность геометрических осей резьбонарезного инструмента и обрабатываемой заготовки, а также взаимное осевое перемещение на шаг нарезаемой резьбы за каждый оборот инструмента или заготовки (самоцентрирование и самоподачу), т.е. специфические условия обработки, позволяющие получать на деталях более точные резьбовые соединения.

3.9.4. Нарезание резьбы фрезами

Особенностью конструкции рассмотренной группы резьбонарезных инструментов является то, что вершины зубьев режущей части резьбового профиля у них срезаны по наклонным линиям, имеют последовательно возрастающую высоту, не имеют жесткого базирования и не получают дополнительного формообразующего движения от механизма станка (за исключением резьбовых гребенок). Центрирование резьбонарезных инструментов в заранее заготовленных отверстиях (внутренняя резьба) или на стержнях (наружная резьба) выполняют элементы режущих зубьев самих инструментов. Кроме того, боковые поверхности резьбы, нарезаемой на заготовках, контактируя с боковыми сторонами зубьев резьбонарезного инструмента, выполняют функции механизма продольной подачи станка, обеспечивая дополнительное движение на шаг резьбы.

Резьбовые фрезы предназначены для фрезерования резьбы на специальных резьбофрезерных станках. Резьбовые фрезы бывают двух видов: дисковые и гребенчатые. Гребенчатые фрезы предназначены для нарезания коротких треугольных резьб, дисковые – длинных резьб (винтов). Каждый тип фрезы применяют на резьбофрезерном станке соответствующей группы. Направление канавок у гребенчатой фрезы – прямое или винтовое с углом наклона $5...8^\circ$; длина режущей части – на 2...3 нитки больше длины нарезаемой резьбы; угол $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8...10^\circ$.

На рис. 3.56 показаны схемы обработки наружной (а) и внутренней (б) резьбы гребенчатыми фрезами. Фреза 1 и обрабатываемая деталь 2 имеют вращательное движение; кроме того, фреза имеет движение подачи вдоль оси детали. Общий путь движения подачи примерно равен 1,4 шага нарезаемой резьбы.

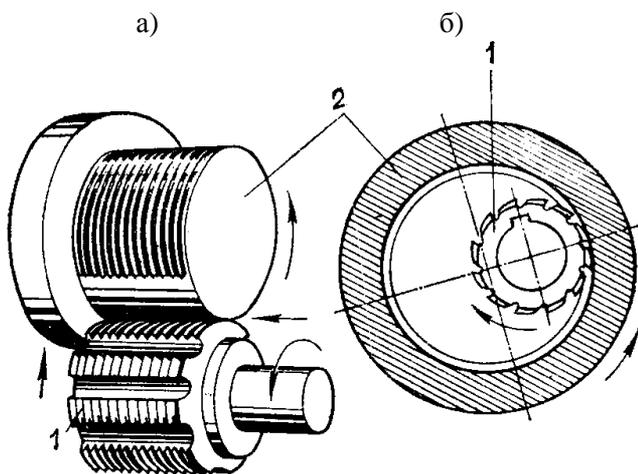


Рис. 3.56. Схема работы гребенчатых резьбовых фрез при нарезании наружной (а) и внутренней (б) резьбы

Вращательное движение, сообщаемое фрезе, является главным движением; вращательное движение заготовки вокруг своей оси – движением окружной подачи. Поступательное движение вдоль оси вращения является дополнительным движением формообразования, которое характеризуется скоростью резания и подачей на зуб фрезы S_z , количественно выражаемой величиной, равной шагу нарезаемой резьбы.

Процесс резьбофрезерования значительно более производительен, чем нарезания резьбы резцом. К его недостаткам следует отнести более низкую точность обработки, в результате чего после резьбофрезерования часто приходится производить калибровку резьбы. Так, резьбофрезерование дисковыми фрезами винтов обычно применяется в качестве черновой обработки; чистовое нарезание винтов производится резцами.

3.9.5. Режимы резания резьбонарезными инструментами

Суммарное воздействие моментов сил резания, приложенных к лезвиям, и моментов сил трения, действующих на боковых поверхностях всех зубьев, осуществляющих срезание припуска и формирование резьбового профиля, ведет к появлению крутящего момента. Чем больше зубьев находится в процессе резания, тем больше крутящий момент. Когда работают все зубья, расположенные на длине режущей части l_p гребенчатых резьбонарезных инструментов, крутящий момент достигает наибольшего значения. При нарезании резьб в сквозных отверстиях (гайках), когда длина режущей части больше глубины отверстия l_d (рис. 3.57), одновременно в работе может находиться только часть режущих зубьев, равная

$$z_0 = (l_d \cdot K_p) / P,$$

где K_p – число режущих резьбовых профилей;

P – шаг резьбы.

При этом максимальный крутящий момент развивается тогда, когда режущая часть метчика пройдет вдоль оси детали расстояние, равное глубине отверстия (высоте детали) l_d . При дальнейшем продвижении метчика вдоль оси детали ширина срезаемого слоя каждым режущим зубом уменьшается, что вызывает уменьшение суммарного поперечного сечения срезаемого слоя и крутящего момента.

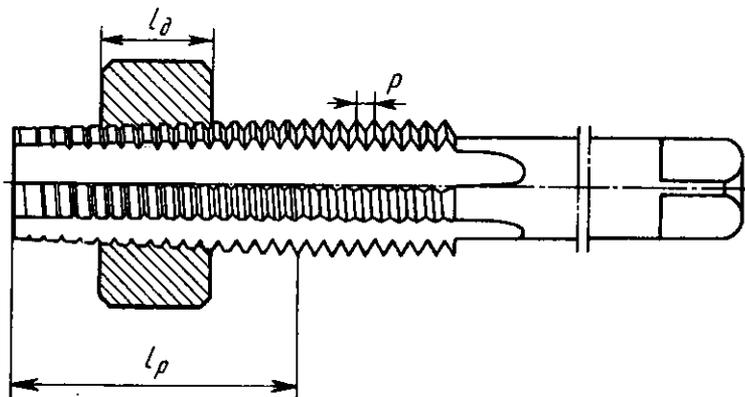


Рис. 3.57. Положение нарезаемой гайки на режущей части гаечного метчика

Уравнение крутящего момента (в Н · м) для разных типов резьбонарезных инструментов:

$$M_{кр} = C_M \cdot K_M \cdot D^x \cdot P^y,$$

где D – наружный диаметр нарезаемой резьбы, мм;

P – шаг нарезаемой резьбы, мм.

Значения коэффициента C_M , K_M и показателей степени x и y берутся из справочников.

Эффективная мощность (в кВт), затрачиваемая на нарезание резьбы, определяется по уравнению

$$N_э = 60 \cdot M_{кр} \cdot n,$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, кН · м;

n – частота вращения, об/мин.

С помощью круглых плашек наиболее качественные резьбы на заготовках из сталей повышенной пластичности можно получить при скорости резания $V < 2$ м/мин, а при резании более твердых и менее пластичных сталей – при 4...5 м/мин.

При резании самооткрывающимися резьбонарезными головками предпочтительна скорость резания $V < 12...16$ м/мин. При более высоких скоростях резания резьбовые витки на заготовке повреждаются или разрушаются.

Скорости резания метчиками принимаются в пределах 10...20 м/мин, хотя быстрорежущими автоматными метчиками можно нарезать резьбы в гайках со скоростями резания до 50 м/мин.

Скорость резания метчиками, круглыми плашками и самооткрывающимися резьбовыми головками вычисляется по уравнению

$$V = \frac{C_v \cdot K_v \cdot D^{1,2}}{T^m \cdot P^x},$$

где C_v – коэффициент, учитывающий условия обработки;

D – наружный диаметр резьбы;

K_v – поправочный коэффициент, учитывающий марку обрабатываемого материала и вид инструмента;

T – назначаемая стойкость, мин;

P – шаг резьбы, мм.

Скорость резания резьбовыми резцами, одно- и многодисковыми фрезами рассчитывается по уравнению:

$$V = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot P^x \cdot S_z^y},$$

где S_z – окружная подача заготовки, мм/зуб.

Значения коэффициентов C_v , K_v и показателей степени m , x и y для всех видов резьбонарезных инструментов берутся из справочников.

При нарезании резьбы резьбовыми резцами с выходом в канавку шириной f ограничивающим фактором скорости резания является время τ на отвод резца:

$$V \leq \frac{\pi \cdot D \cdot f}{1000 \cdot P \cdot \tau}.$$

При ручном отводе резца время τ может быть взято в пределах 0,01...0,04 мин.

Основное технологическое время при резьбонарезании рассчитывается по следующим уравнениям:

для резьбовых резцов:

$$T_0 = \frac{(l_d + l_1 + f) \cdot i \cdot g}{n \cdot P};$$

для гаечных и машинных метчиков, нарезающих резьбу в сквозных отверстиях:

$$T_0 = \frac{l_d + l_p}{n \cdot P};$$

для круглых плашек и машинных метчиков, нарезающих резьбу в глухих отверстиях:

$$T_0 = \frac{l_d - l_p}{n \cdot P},$$

где l_d – длина нарезаемой резьбы, мм;
 l_1 – путь врезания, мм;
 f – ширина выточки для выхода резьбового резца, мм;
 i – число проходов резьбового резца;
 g – число заходов нарезаемой резьбы;
 l_p – длина рабочей части инструмента, мм;
 n – частота вращения обрабатываемой детали или инструмента, об/мин;
 P – шаг резьбы, мм.

3.9.6. Особенности износа лезвий резьбонарезного инструмента

Резьбонарезные инструменты работают с относительно малыми скоростями резания и толщинами срезаемого слоя при обильном поливе рабочей зоны струей смазывающе-охлаждающей жидкости. В таких условиях резания нагрев инструмента незначителен. Лезвия круглых плашек в процессе работы нагреваются до 200°C; на остальных гребенчатых резьбонарезных инструментах температура нагрева лезвий не превышает 400°C, что ниже температуры отпуска инструментальных сталей, из которых изготавливают резьбонарезные инструменты. Поэтому температурное состояние лезвий слабо влияет на интенсивность их изнашивания и не является лимитирующим фактором при определении режимов резьбонарезания.

Основным при работе резьбонарезных инструментов является износ по задним поверхностям. На автоматных и гаечных метчиках, где режущие зубья срезают тонкие слои припуска (до 0,01 мм), изнашиваются только задние поверхности лезвий. На машинных метчиках и круглых плашках зубья срезают более толстые слои (до 0,1...0,25 мм), что приводит к развитию износа по задним и по передним поверхностям лезвий. Наибольшее значение износ задней поверхности достигает на последних рабочих и первом калибрующем зубьях.

Наибольший допустимый износ по задней поверхности, принимаемый за критерий износа резьбонарезных инструментов, имеет следующие значения: круглые плашки – 0,1 мм, машинные метчики – 0,125 диаметра нарезаемой резьбы (в мм); черновые резьбонарезные резцы – 2 мм; чистовые профильные резцы – 0,3 мм.

Так как износ режущих лезвий в значительной степени определяется работой сил трения между контактирующими поверхностями обрабатываемых заготовок и лезвий, для облегчения условий резания нарезание резьбы всегда ведется с применением смазывающе-охлаждающих жидкостей, использование которых позволяет повысить точность нарезаемых резьб и улучшить шероховатость поверхностей.

3.10. Шлифование

3.10.1. Основные сведения о процессе шлифования

Шлифование – это технологический способ обработки металлов абразивным инструментом, позволяющий получать на деталях поверхности высокого качества с высокой точностью размеров.

Шлифованием обрабатывают поверхности всех классов. Обычно оно применяется для повышения точности размеров и формы поверхностей, формообразование которых на предыдущих этапах обработки осуществлено другими способами (точением, фрезерованием и т.д.). Чаще всего шлифуемые заготовки после предварительной обработки подвергаются закалке или химико-термической обработке.

В зависимости от требований к точности шлифование может быть обдирочным, предварительным, чистовым или тонким. Припуски для каждого вида шлифования зависят от диаметра, длины и твердости обрабатываемой детали и изменяются от 0,25 до 1,05 мм.

Обдирочное шлифование – обработка абразивным инструментом поверхности заготовки без предварительной лезвийной обработки. При обдирочном шлифовании снимается припуск до 1 мм и более на диаметр, достигается шероховатость обработанной поверхности $Ra = 2,5 \dots 5,0$ мкм, точность – 8...9-й квалитет. Данный метод обработки применяется при наличии точных заготовок, имеющих плохую обрабатываемость лезвийным инструментом.

Предварительное шлифование ведется после лезвийной обработки (например, чистового точения). Достигается $Ra = 1,25 \dots 2,5$ мкм; точность – 6...8-й квалитет. Предварительное шлифование используется для подготовки обрабатываемой поверхности детали под окончательную (чистовую) обработку.

Чистовое шлифование используется как метод окончательной обработки поверхностей: $Ra = 0,2 \dots 1,25$ мкм; точность – 5...6-й квалитет.

Тонкое шлифование – финишный метод обработки, служащий, в основном, для уменьшения шероховатости обработанных поверхностей. Достигается $Ra = 0,005 \dots 0,1$ мкм. Тонкое шлифование экономически целесообразно в условиях единичного и мелкосерийного производств, так как требует тщательной предварительной подготовки поверхности под шлифование. Величина снимаемого припуска – не более $0,05 \dots 0,1$ мкм.

Шлифование выполняется специальными инструментами, к которым относятся шлифовальные круги, бруски, а также шкурками, порошками и пастами. В отличие от ранее рассмотренных инструментов, лезвия которых имеют определенную чертежом форму и размеры, абразивный инструмент режет абразивными зёрнами из минералов и сверхтвёрдых материалов, имеющими случайные форму и взаимное расположение. В резании обычно участвует одновременно большое число абразивных зёрен, кромки которых, имея малые размеры, образуют режущую поверхность. Отличительной чертой шлифования является то, что абразивный инструмент имеет прерывистые режущие кромки и не имеет определенных значений углов α , γ , ϕ и др.

3.10.2. Основные схемы шлифования

Процесс шлифования обычно осуществляется посредством трех движений – вращения вокруг своей оси шлифовального круга, вращения или возвратно-поступательного перемещения детали и движения подачи.

Различают следующие основные схемы шлифования: круглое (внутреннее, наружное с продольной подачей и врезное) и плоское (торцом или периферией круга).

Круглое наружное шлифование с продольной подачей (рис. 3.58 а) осуществляется при вращении шлифовального круга и обрабатываемой детали. Скорость вращения круга (главное движение резания) намного больше скорости вращения заготовки. Кроме того, заготовке сообщается возвратно-поступательное движение продольной подачи $D_{\text{спрод}}$. По окончании цикла возвратно-поступательного движения продольной подачи действует прерывистое движение поперечной подачи $D_{\text{споп}}$, сообщаемое шлифовальному кругу или заготовке.

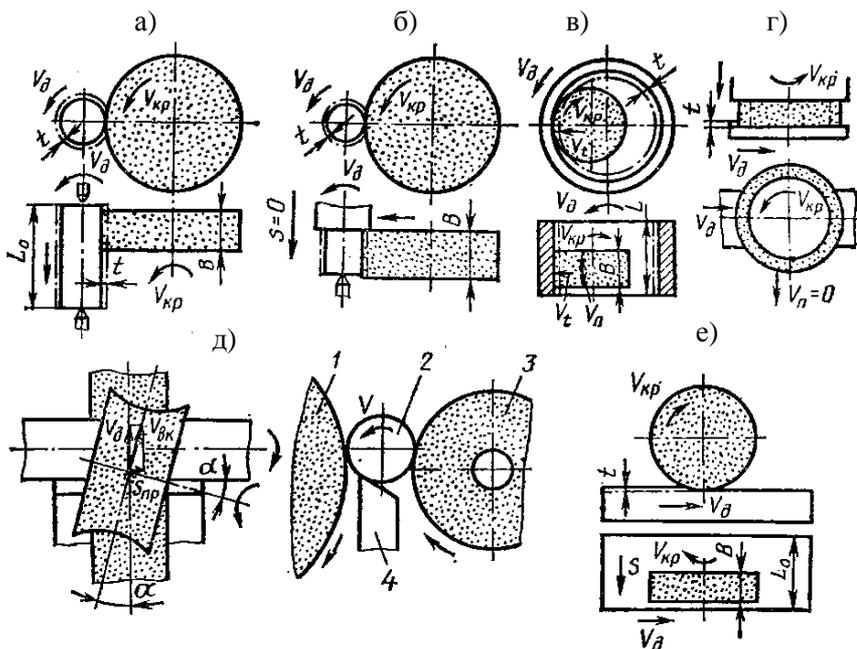


Рис. 3.58. Схемы шлифования

По схеме круглого наружного шлифования с продольной подачей обрабатываются поверхности длиной более 50 мм, а также конические поверхности (в этом случае шлифовальный круг поворачивается на необходимый угол наклона образующей обрабатываемого конуса или оси вращения круга, и заготовки пересекаются под тем же углом).

При *круглом наружном шлифовании с поперечной подачей (врезном шлифовании)* (рис. 3.58 б) шлифовальный круг и обрабатываемая заготовка также совершают вращательное движение, но продольная подача отсутствует; обработка заготовки идет только с поперечной подачей.

При врезном шлифовании обрабатываются поверхности небольшой протяженности, длина которых равна или меньше ширины шлифовального круга. Усилия в зоне резания при этом значительно больше усилий при шлифовании с продольной подачей, что требует применения более мощных станков. Точность обработки в этом

случае ниже, так как дефекты правки шлифовального круга непосредственно переносятся на поверхность заготовки.

При **круглом внутреннем шлифовании** (рис. 3.58 в) шлифовальный круг и обрабатываемая заготовка имеют вращательное движение; наружная поверхность круга касается внутренней цилиндрической поверхности заготовки. Движения продольной $D_{\text{спрод}}$ и поперечной $D_{\text{споп}}$ подачи происходят так же, как при наружном круглом шлифовании, и приложены обычно к шлифовальному кругу. Возможна также обработка внутренних конических поверхностей.

Плоское шлифование может вестись двумя методами: торцом и периферией круга (рис. 3.58 г, д). Главным движением резания, которое характеризуется скоростью резания V , является вращение шлифовального круга. Обрабатываемая заготовка совершает два возвратно-поступательных движения – продольной и поперечной подачи. После обработки плоскости шлифовальному кругу сообщается движение вертикальной подачи $D_{\text{свер}}$. Обработка всей плоскости повторяется до тех пор, пока значение суммарной вертикальной подачи не будет равно припуску на обработку данной поверхности шлифованием.

3.10.3. Шлифовальный круг как режущий инструмент

Шлифовальные круги состоят из множества абразивных зерен, выполняющих функции режущих зубьев, связки, соединяющей все абразивные зерна в единую неразъемную конструкцию, и пор (промежутков между абразивными зёрнами шлифовального круга и связующими их веществами), играющих роль впадин между зубьями, в которых размещается стружка. От соотношения трех названных составляющих зависят режущие свойства этих инструментов.

Шлифовальные круги характеризуются структурой, видом связки и твердостью.

В зависимости от содержания абразивных зерен в объеме шлифовальных кругов их **структура** может быть плотной, средней, открытой и очень открытой. Более тонкая градация структур шлифовальных кругов осуществляется присвоением каждой группе номера от 0 до 20.

При **плотной структуре** шлифовальных кругов (рис. 3.59 а) в круге содержится 50...60% абразивных зерен, весьма плотно распо-

ложенных в его объеме; связующего вещества немного; поры, в которых может разместиться небольшое количество срезаемой стружки, имеют малые размеры. Поэтому применение шлифовальных кругов с плотной структурой ограничено доводочными операциями.

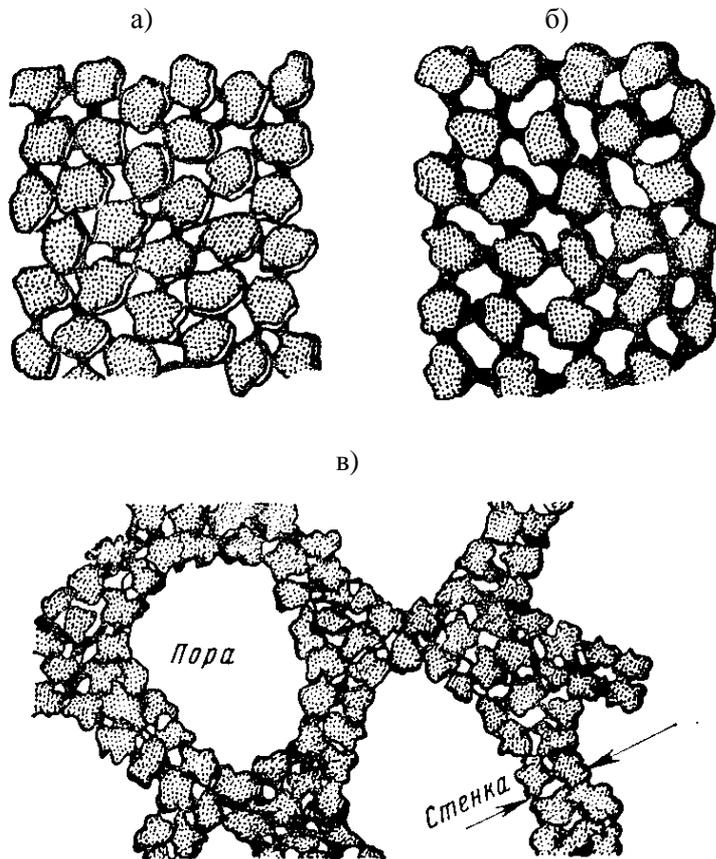


Рис. 3.59. Структура шлифовального круга:
 а – закрытая; б – открытая; в – высокопористая

При *средней структуре* в объеме круга содержится 46...54% абразивных зерен; связующие вещества более толстым слоем обволакивают зерна; прочность соединения зерен увеличивается; расположенные между зернами и связкой поры имеют несколько большие объемы для размещения срезаемой стружки. Обычно абразив-

ные круги со структурой № 4 содержат крупные абразивные зерна и применяются для предварительного шлифования. Шлифовальные круги со структурами № 5, 6 имеют менее крупные зерна и применяются для чистового шлифования, № 7, 8 – для обработки вязких материалов и финишного шлифования.

Открытая структура (рис. 3.59 б) характеризуется объемным содержанием 38...44% абразивных зерен, расположенных свободно, и более прочным их соединением, позволяющим повысить прочность круга в целом. Между абразивными зернами и связкой размещаются крупные поры, в которые свободно проходит стружка, срезаемая за рабочий цикл. Во время холостого цикла, когда данный участок режущей поверхности круга выходит из контакта с обрабатываемым металлом, срезанные частицы выбрасываются из пор центробежными силами. Круги открытой структуры можно использовать для шлифования металлов при высоких режимах резания.

Круги с **очень открытой структурой** (рис. 3.59 в) содержат абразивных зерен 25...36 % от общего объема круга и применяются для шлифования мягких и вязких материалов, преимущественно – неметаллов (резины, пластмасс, дерева, кожи и т.п.).

Связующие вещества (связки) – это вещества или совокупность веществ, используемых для закрепления зерен в инструменте с целью придания шлифовальным кругам необходимой формы и размеров. Связки бывают неорганические (минеральные), органические (смолы, каучук) и металлические. В промышленности около 60 % инструментов изготавливают на неорганической связке, около 33 % – на бакелитовой, около 6 % – на вулканитовой и около 1 % – на прочих связках.

В группу **неорганических связок** входят керамические, магниезиальные и силикатные связки, сырьем для которых являются стекло, полевой шпат и другие минералы.

Керамические связки обозначаются буквой К. В зависимости от состава они делятся на *плавящиеся* (стекловидные) и *спекающиеся* (фарфоровидные). Абразивные инструменты, содержащие зерна электрокорунда, изготавливают на основе плавящихся связок, а инструменты, содержащие зерна из карбида кремния, – на основе спекающихся.

В зависимости от содержания различных компонентов керамические связки выпускают разных марок (К1...К8). Шлифовальные

круги с электрокорундовыми зёрнами зернистостью 125...16 изготавливают на связке К8; мелкозернистые шлифовальные круги зернистостью 12...4 – на К7; круги, содержащие зёрна из белого электрокорунда, – на связке К1 и боросодержащей связке К5, что позволяет получить повышенную износостойкость кромок и профиля круга. Шлифовальные круги, содержащие абразивные зёрна из карбида кремния зернистостью 50...16, изготавливаются на связке К3, а мелкозернистые зернистостью 12...4 – на К2.

Шлифовальные круги на керамической связке отличаются хрупкостью и не допускают работы с ударными нагрузками. Из-за хрупкости керамической связки абразивные зёрна, достигшие некоторого критического значения износа, при очередном рабочем цикле выламываются из монолита, обнажая лежащие ниже зёрна и тем самым обеспечивая самозатачивание в процессе шлифования. Шлифование кругами на керамической связке ведётся, как правило, с применением охлаждающих жидкостей.

Магнезиальные (на основе каустического магнезита и хлорида магния) и *силикатные* (на основе растворимого стекла) связки применяются сравнительно редко в кругах для обработки вязких сталей.

К **органическим связкам** относятся бакелитовая, вулканитовая и некоторые другие виды связок. Их основой являются синтетические смолы. Наибольшее распространение в этой группе получили бакелитовые связки на основе феноло-формальдегидной смолы марок Б, Б1...Б3.

Бакелитовые связки придают шлифовальным кругам прочность и эластичность, но при нагреве до температуры выше 200°C становятся хрупкими, и шлифовальные круги быстро изнашиваются. При продолжительном воздействии температур порядка 250...300°C эти связки выгорают. Однако шлифовальные круги, в том числе и алмазные, изготовленные на бакелитовой связке, обладают хорошими режущими свойствами и способны обрабатывать материалы с малыми силами резания. Ими можно затачивать лезвия режущих инструментов без применения охлаждающих жидкостей.

Мелкозернистые шлифовальные круги на бакелитовой связке, содержащие зёрна из электрокорундов и карбида кремния, применяются для чистового и доводочного шлифования чугунов, сталей и цветных металлов; шлифовальные круги на связке Б3 – для шлифования резьб и разрезки прутков.

Шлифовальные круги на бакелитовых связках имеют значительно большую ударную вязкость и прочность на сжатие, чем круги на керамической связке.

Основой *вулканитовой связки* является каучук, в который для осуществления процесса вулканизации добавляется сера. Такие связки в зависимости от содержания компонентов выпускаются нескольких марок – В1, В2, В3. Теплостойкость каучука – низкая (150...180°С), что ограничивает режимы шлифования и требует применения жидкостей для охлаждения. Вместе с тем, вулканитовая связка придает шлифовальным кругам большую эластичность и способность, изгибаясь, выдерживать без разрушения боковые нагрузки. Эти качества вулканитовой связки позволяют изготавливать тонкостенные шлифовальные круги, в частности, дисковой формы, применяющиеся для шлифования узких криволинейных пазов в деталях и инструментах. Шлифовальные круги на связке В2 позволяют шлифовать резьбы с малым шагом.

Металлические связки делятся на два основных вида – порошковые и гальванические. *Порошковые связки* получают спеканием порошков из медных и алюминиевых сплавов и имеют обозначение М1 (на основе бронз), М5 (на основе алюминий-цинковых сплавов); *гальванические* выполняются на никелевой основе.

Характерной особенностью металлических связок является их высокая механическая прочность и незначительная пористость. Связка охватывает зерна практически со всех сторон и надежно удерживает их в монолите, что, несмотря на их значительный износ, препятствует самозатачиванию круга. Поэтому на металлической связке изготавливают только алмазные и эльборовые круги, зерна которых обладают высокой износостойкостью.

Алмазные и эльборовые круги на металлической связке применяются для предварительного и чистового шлифования твердых и хрупких материалов, а также для заточки поверхностей лезвий режущих инструментов. Удельный расход алмазных зерен и износ режущей поверхности алмазных кругов на металлической связке меньше, чем кругов на бакелитовой связке. Металлические связки теплопроводны и быстро нагреваются по всему объему круга до высоких температур, поэтому шлифование алмазными кругами на таких связках ведется с обязательным применением охлаждающих жидкостей.

Под **твердостью** абразивного инструмента понимается условная величина, характеризующая свойство абразивного инструмента сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой.

По твердости абразивные инструменты делятся на: мягкие (М1, М2, М3), среднемягкие (СМ1, СМ2), средние (С1, С2), среднетвердые (СТ1, СТ2, СТ3), твердые (Т1, Т2), весьма твердые (ВТ1, ВТ2) и чрезвычайно твердые (ЧТ1, ЧТ2). Чем меньше твердость абразивных инструментов, тем слабее сцепление между зернами и связкой и тем легче отдельные зерна под действием внешних сил могут быть вырваны из режущей поверхности круга. По мере возрастания сил сцепления между зернами и связкой возрастает и сопротивление разрушениям под действием внешних сил.

Стандартные абразивные инструменты маркируют на нерабочих поверхностях. В **маркировке** указывают марку абразивного материала, зернистость, индекс зернистости, твердость, номер структуры, связку, класс круга, допустимую окружную скорость.

Класс круга определяет допуски на его размеры, геометрическую форму и некоторые другие параметры. Круги делятся на 3 класса: АА, А, Б. Круги класса АА – наиболее, а класса Б – наименее точные. Например, маркировка 15А25НС17К1А35 обозначает: электрокорунд – нормальный марки 15А, зернистость – 25, индекс зернистости – Н, твердость – средняя С1, структура – № 7, связка – керамическая К1, класс круга – А, допустимая окружная скорость – 35 м/с.

3.10.4. Выбор шлифовальных кругов и их правка

В процессе шлифования абразивные зерна инструментов изнашиваются тем интенсивнее, чем тверже обрабатываемый материал и чем выше его истирающие свойства. С изнашиванием зерен возрастают силы резания, способные вырвать из режущей поверхности круга изношенные зерна. Вырывание изношенных зерен приводит к обновлению режущей поверхности, т.е. к включению в резание неизношенных зерен из нижних слоев круга. Таким образом, происходит самозатачивание круга, сопровождаемое изменением положения режущей поверхности (уменьшением наружного диаметра при плоском и круглом шлифовании).

Чтобы использовать свойство самозатачивания абразивных инструментов, шлифование твердых материалов с повышенными ис-

тирающими свойствами ведут мягкими шлифовальными кругами. Например, заточка твердосплавных инструментов ведется кругами с твердостью М2...СМ2.

Чем мягче обрабатываемый материал, тем тверже выбирают круги. Например, шлифование термообработанных конструкционных и инструментальных сталей твердостью 50...65 HRC ведут электрокорундовыми кругами с твердостью СМ и С, конструкционных сталей и чугунов в состоянии поставки – электрокорундовыми кругами с твердостью СТ, сплавов алюминия и меди – кругами с твердостью Т1. Круги с твердостью ВТ и ЧТ используются для предварительной обработки и очистки литья, снятия грата на сварных швах, обработки заготовок в заготовительных цехах, т. е. когда не требуются высокая точность обработки и высокое качество обрабатываемых поверхностей.

В процессе шлифования на протяжении всего рабочего цикла срезаемая каждым зерном стружка может накапливаться только в замкнутом со всех сторон объеме поры, расположенной между соседними зернами режущей поверхности. В результате деформаций, происходящих с высокой скоростью, и трения срезанная стружка нагревается до температуры плавления обрабатываемого материала (выше 1000°С).

За время холостого цикла накопившиеся в объемах пор стружки под действием центробежных сил и потока охлаждающей жидкости удаляются из пор. Внешним проявлением этого является сноп искр, вылетающих из-под круга. Однако часть стружек застревает в объемах пор абразивного круга, и через некоторое время они оказываются заполненными обрабатываемым материалом. Такое явление принято называть *засаливанием* круга. Засаленный круг теряет режущие свойства; поверхность заготовки контактирует уже не с зернами абразива, а со стружкой из обрабатываемого материала, находящейся в его порах. Засаленность абразивного инструмента вызывает повышение затрат энергии на процесс резания и температуры на режущей поверхности круга и обрабатываемой поверхности заготовки, что, в свою очередь, приводит к снижению качества шлифуемой детали, выраженному в *прижогах* на обработанной поверхности, возникающих при нагреве поверхности до температуры 250...300°С, при которой в поверхностных слоях могут произойти структурные изменения и образование трещин.

Абразивные инструменты со степенью твердости М и СМ изнашиваются преимущественно благодаря их способности к самозатачиванию, вследствие которой абразивные зерна вырываются или выкрашиваются действующими силами резания и трения. Более твердые абразивные инструменты (со степенью твердости С, СТ и Т) изнашиваются вследствие частичного раскрашивания зерен и стирания их вершин от действия обрабатываемого материала, в результате которого на вершинах абразивных зерен образуются изношенные площадки, препятствующие внедрению абразивных зерен в обрабатываемый материал. Такие круги считаются изношенными и для дальнейшей работы непригодны.

Для возвращения шлифовальным кругам режущей способности после засаливания или износа режущих лезвий абразивных зерен, а также для придания кругам заданной формы, необходимо производить их *правку*.

На обдирочных операциях, когда не предъявляется высоких требований к точности и шероховатости шлифованной поверхности, правку выполняют металлическими звездочками и шарошками, закрепленными в державках на столах станков, монолитными твердосплавными дисками, обломками твердых абразивных кругов, брусками из крупно- и среднезернистых карбидов кремния, закрепленными в оправках. На чистовых операциях, когда требуется точная и качественная обработка поверхности, и при заточке режущего инструмента правку проводят обкатыванием правочными роликами из твердого сплава или абразивных материалов или алмазными карандашами.

Правочные ролики раздавливают и выламывают зерна на подвергаемой правке режущей поверхности круга; алмазные карандаши представляют собой державки, в которых механически или с помощью связующих веществ закреплены алмазы различных размеров: в карандашах марки Н алмазы располагаются неупорядоченно, марки С – слоями, марки Ц – цепочкой вдоль оси. Правка изношенного шлифовального круга алмазными карандашами выполняется, как обточка круга по его режущей поверхности, на глубину, обеспечивающую удаление изношенных абразивных зерен и восстановление заданной формы режущей поверхности круга.

3.10.5. Элементы процесса шлифования. Сила резания и мощность при шлифовании

Под *скоростью шлифования* V (м/с) понимают скорость точек, расположенных на режущей поверхности шлифовальных кругов. Ее рассчитывают по формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000},$$

где D – диаметр круга, мм;

n – частота вращения шпинделя, об/мин.

Скорость шлифования обычно не превышает 30 м/с и ограничена механической прочностью шлифовальных кругов, выполненных на керамической связке. Шлифование со скоростями $V > 30$ м/с допустимо только при использовании кругов, выполненных на металлических связках и на керамической связке при их армировании специальными прокладками из высокопрочных полимеров или металлическими бандажами, заложенными в круги в процессе их изготовления. Скорость шлифования такими кругами может достигать 60 м/с и больше. В процессе эксплуатации по мере износа и повторных правок диаметр шлифовальных кругов постепенно уменьшается, что ведет к уменьшению скорости шлифования.

Окружная скорость вращения детали при круглом шлифовании заготовок из стали и чугуна находится в пределах 20...60 м/мин.

Глубина резания t совпадает с величиной поперечной подачи круга. При черновом шлифовании она берется в пределах 0,01...0,08 мм, при чистовом – 0,005...0,015 мм. Общий припуск на диаметр при шлифовании деталей зависит от диаметра, длины обрабатываемой поверхности и наличия или отсутствия термической обработки. Например, для валов он колеблется в пределах 0,2...1,2 мм.

При наружном и внутреннем круглом, а также при плоском шлифовании силу резания можно разложить на 3 составляющих (рис. 3.60): тангенциальную (касательную) P_Z , радиальную P_Y и осевую P_X . Для шлифования

$$P_Y = (1,5...3) \cdot P_Z; \quad P_X = (0,1...0,2) \cdot P_Z.$$

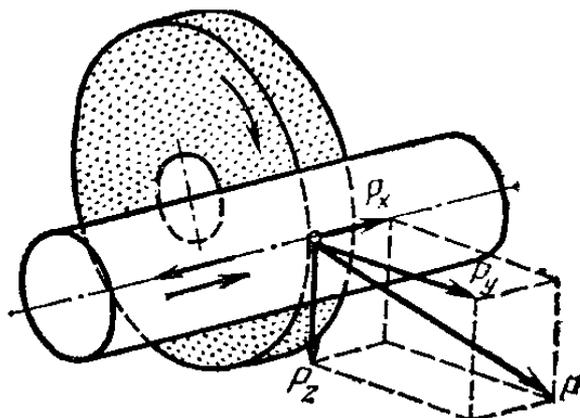


Рис. 3.60. Схема сил, действующих при шлифовании

Так как составляющая P_z действует в направлении главного движения резания, то именно она определяет значение эффективной мощности:

$$P_z = \frac{1000 \cdot N_{\text{э}}}{V}$$

При шлифовании конструкционных сталей, чугунов и высоколегированных сплавов затрачиваемая эффективная мощность (в кВт) для наружного и внутреннего круглого шлифования выражается зависимостью

$$N_{\text{экруг}} = C_N \cdot S_{\text{прод}} \cdot S_{\text{окр}}^{0,7} \cdot S_{\text{поп}}^{0,7}$$

где $S_{\text{прод}} = (0,6 \dots 0,8) \cdot B$ – продольная подача, мм/об;

$S_{\text{поп}}$ – поперечная подача, мм/дв.ход;

$S_{\text{окр}} = V_3$ – окружная подача, равная линейной скорости точек на обрабатываемой поверхности заготовки, м/мин;

B – ширина шлифовального круга, мм.

Для плоского шлифования

$$N_{\text{эпл}} = C_N \cdot S_{\text{поп}} \cdot S_{\text{прод}}^{0,7} \cdot S_{\text{верт}}^{0,7}$$

где $S_{\text{поп}} = (0,6 \dots 0,8) \cdot B$ – поперечная подача, мм/дв. ход;

$S_{\text{верт}}$ – вертикальная подача, мм/ход;

$S_{\text{прод}}$ – продольная подача, м/мин.

Коэффициент C_N зависит от вида шлифования и диаметра шлифуемой заготовки.

Из двух действующих при шлифовании составляющих силы резания на значение крутящего момента влияет только составляющая P_z .

Крутящий момент для наружного и внутреннего круглого шлифования

$$M_{\text{кр кругл}} = \frac{C_0 \cdot D \cdot D_{\text{заг}}^{\text{п}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot S_{\text{поп}}^{0,7} \cdot S_{\text{окр}}^{0,7} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{2 \cdot V};$$

для плоского шлифования

$$M_{\text{кр пл}} = \frac{C_0 \cdot D \cdot S_{\text{поп}} \cdot S_{\text{прод}}^{0,7} \cdot S_{\text{верт}}^{0,7} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{2 \cdot V},$$

где D – диаметр шлифовального круга.

Основное время шлифовальных операций определяется с учетом схемы шлифования, количества и длины двойных ходов, необходимых для обработки всей обрабатываемой поверхности и удаления оставленного на обработку припуска и скорости продольной подачи.

Если длина перемещения заготовки при осуществлении одного двойного хода $l = 2 \cdot 1$ мм, то время (мин) на выполнение i_p рабочих и i_B выхаживающих ходов равно

$$T_0 = \frac{2l \cdot (i_p + i_B)}{S_{\text{прод}}}.$$

Для **круглого наружного шлифования** длина одного двойного хода заготовки равна

$$2l = 2 \cdot (l_3 + l_1 + B + l_2),$$

где l_3 – длина обрабатываемой поверхности;

l_1 и l_2 – длины перебега соответственно с правой и с левой стороны шлифовального круга;

B – ширина шлифовального круга.

При **круглом внутреннем шлифовании** длина одного двойного хода заготовки равна

$$2l = 2 \cdot (l_3 + l_2 - l_1).$$

При **плоском шлифовании** длина двойного продольного хода

$$2l = 2 \cdot (l_3 + l_1 + l_2).$$

3.10.6. Методы финишной обработки поверхностей

Эластичное шлифование отличается от обычного характером связи абразивных зерен с инструментальным шпинделем. В данном случае конструкция инструмента допускает в процессе работы значительное упругое перемещение рабочих зерен, попадающих в зону контакта с обрабатываемой заготовкой, в направлении нормальной составляющей (P_y) силы резания. Такое закрепление абразива в эластичной связке позволяет: уменьшать напряженность теплового потока в зоне обработки; увеличивать количество абразивных зерен, одновременно участвующих в работе; создавать в некоторых случаях условия для самоочистки рабочей поверхности инструмента.

Основное назначение эластичного шлифования состоит в повышении качества поверхности без исправления погрешности ее формы. В некоторых случаях способ эластичного шлифования применяется для формообразования (размерной обработки). В зависимости от требований к качеству обработанной поверхности различают зачистку, шлифование и полирование. При **зачистке** целью обработки является удаление дефектного слоя на слитках и отливках или заусенцев после механической обработки (штамповки), а также заделка отдельных дефектов поверхностей; при эластичном **шлифовании** и **полировании** – повышение качества поверхности, т.е. снижение параметра R_a и повышение уровня сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях материала.

Хонингование применяют для повышения точности формы и размеров, снижения шероховатости поверхностей (чаще всего – внутренних цилиндрических) в условиях серийного и массового производства после операций растачивания, шлифования, развертывания и протягивания. После хонингования в зависимости от условий обработки и исходной шероховатости получают значения $Ra = 0,08...0,32$ мкм и квалитеты точности 5...7-й.

Обработка поверхности при хонинговании производится абразивными, эльборовыми или алмазными брусками, закрепленными в специальной головке, называемой *хоном*. Головке сообщают вращательное и возвратно-поступательное движение; бруски при этом с силой $P_{рад}$ прижимаются к обрабатываемой поверхности, обеспечивая радиальную подачу. При вибрационном хонинговании на основное возвратно-поступательное или вращательное движение хонинговальной головки (или детали) накладывается дополнительное колебательное движение с малой (обычно 1...4 мм) амплитудой и частотой 20 Гц.

Суперфиниширование – это отделочная обработка цилиндрических, конических, тороидальных, сферических и плоских поверхностей деталей мелкозернистыми абразивными брусками. Этот способ существенно повышает эксплуатационные свойства поверхностей, работающих в условиях трения скольжения и качения, так как с его помощью можно достичь параметра шероховатости $Ra = 0,02...0,16$ мкм и погрешности формы (огранки), не превышающей 0,5 мкм. При этом удаляется дефектный слой, полученный в ходе предыдущей операции (шлифования), а поверхность получает упрочнение.

Схема суперфиниширования показана на рис. 3.61. Заготовка вращается с частотой n и перемещается с осевой подачей $S_{прод}$. Мелкозернистый абразивный брусок (два бруска) с помощью пружин прижимается к обрабатываемой поверхности заготовки с относительно небольшой силой; кроме того, он получает колебательное движение с частотой от 10 до 50 Гц и амплитудой 2...5 мм.

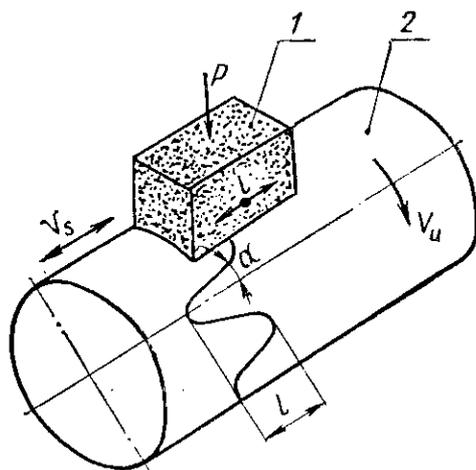


Рис. 3.61. Схема суперфиниширования

Содержание

Введение.....	3
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ.....	4
1.1. Резание как технологический способ обработки конструкционных материалов.....	4
1.2. Кинематика процесса резания.....	8
1.3. Элементы режима резания.....	10
1.4. Конструктивные элементы и геометрические характеристики токарного резца.....	11
1.5. Кинематические углы токарного резца.....	16
1.6. Сечение срезаемого слоя.....	18
1.7. Основное технологическое время.....	19
2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	21
2.1. Общая характеристика инструментальных материалов.....	21
2.2. Инструментальные стали.....	24
2.3. Твердые сплавы и сверхтвердые инструментальные материалы.....	29
2.4. Абразивные материалы.....	34
3. ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ.....	41
3.1. Физические явления, сопровождающие процесс резания металлов.....	41
3.2. Конструкционные металлические материалы, обрабатываемые резанием.....	55
3.3. Классификация и маркировка металлорежущих станков.....	69
3.4. Обработка точением.....	72
3.5. Обработка осевым размерным инструментом.....	89
3.6. Обработка металлов фрезерованием.....	100
3.7. Протягивание.....	121
3.8. Зубонарезание.....	128
3.9. Резьбонарезание.....	139
3.10. Шлифование.....	153

Учебное издание

ИВАНОВ Игорь Аркадьевич
ИВАЩЕНКО Сергей Анатольевич
МОЛОЧКО Владимир Иванович
ЧЕРНОВЕЦ Василий Иванович

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Учебное пособие
для студентов специальности 1-02 06 02
«Технология (по направлениям). Дополнительная специальность»

В 3-х частях

Часть 1

ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
И МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Редактор Т.А.Палилова. Корректор М.П.Антонова
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

Подписано в печать 19.02.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 10,8. Уч.-изд. л. 7,8. Тираж 150. Заказ 353.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.