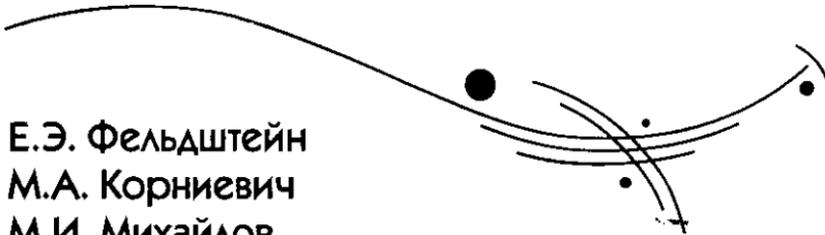


Е.Э. Фельдштейн
М.А. Корниевич
М.И. Михайлов



Обработка материалов и инструмент

Рекомендовано Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования» в качестве учебного
пособия для студентов среднего профессионального образования,
обучающихся по техническим специальностям

Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для учащихся специальности
«Технология машиностроения» учреждений, обеспечивающих
получение среднего специального образования



УДК 621.9(075.32)
ББК 34.63-5я723
Ф39

Серия основана в 2007 году

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
Брестского государственного технического университета,
кандидат технических наук, доцент *А.В. Драган*;

цикловая комиссия технологии машиностроения
Минского государственного машиностроительного колледжа (*В.С. Мурысева*)

Фельдштейн, Е.Э.

Ф39 **Обработка материалов и инструмент : учеб. пособие /**
Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич, М.И. Михайлов. —
Минск : Новое знание, 2009. — 317 с. : ил. — (Профессио-
нальное образование).

ISBN 978-985-475-338-6.

Рассмотрены основные вопросы, связанные с обработкой материалов резанием и конструкцией инструментов для ее реализации: общие сведения о механической обработке и инструментальных материалах, процессах точения, фрезерования, протягивания, обработки отверстий, нарезания резьб и зубьев, абразивной обработки. Представлены сведения о современных технологических методах обработки материалов (электроэрозионном, электрохимическом, лазерном), а также особенностях инструментов для автоматизированного производства.

Для учащихся средних специальных учебных заведений, обучающихся по специальности «Технология машиностроения». Может быть полезно учащимся профессионально-технических учебных заведений, обучающимся по машиностроительным специальностям.

УДК 621.9(075.32)
ББК 34.63-5я723

ISBN 978-985-475-338-6

© Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А., Михайлов М.И., 2009
© Оформление. ООО «Новое знание», 2009

Предисловие

Машиностроение призвано сыграть ведущую роль в ускорении научно-технического прогресса в народном хозяйстве нашей страны. Характерными чертами его развития являются автоматизация технологических процессов, широкое внедрение робототехники, высокая производительность труда. Среди различных технологий, применяемых в машиностроении, обработка резанием является одним из основных методов получения точных деталей машин. Поскольку требования к точности машин и приборов повышаются, становится бесспорной перспективностью развития процессов механической обработки. Их универсальность и гибкость обеспечивают преимущества перед другими способами изготовления деталей, особенно при производстве изделий небольшими партиями.

Производительность и эффективность работы металлообрабатывающего оборудования, качество и точность получаемых деталей машин во многом зависят от того, как функционируют системы, связанные с режущим инструментом и реализацией процесса обработки. Формирование у учащихся учреждений, обеспечивающих получение среднего специального образования, общих представлений об этом процессе является основной целью дисциплины «Обработка материалов и инструмент». Главная ее задача — знакомство учащихся с основными закономерностями процессов резания различными типами режущих инструментов, а также с их современными конструкциями и методиками проектирования.

Предлагаемое учебное пособие состоит из девяти глав, в которых рассматриваются следующие вопросы:

глава 1: современные способы обработки материалов, основные движения при их обработке резанием, а также виды и области применения современных инструментальных материалов (быстрорежущих сталей, твердых сплавов, минералокерамики и сверхтвердых материалов);

глава 2: общие понятия о геометрии режущего лезвия, элементах режима резания и срезаемого слоя, основных физических процессах, имеющих место в зоне резания (стружкообразовании, возникновении нароста, сопротивлении резанию, особенностях теплообмена, характере изнашивания и др.); современные конструкции и методика проектирования резцов общего назначения и фасонных резцов, резцовых вставок и расточных инструментов;

глава 3: основные закономерности работы осевых инструментов для обработки отверстий (сверл, зенкеров и разверток), особенности их геометрии, конструктивных элементов, методики расчета основных параметров;

глава 4: закономерности процессов фрезерования цилиндрическими и торцовыми фрезами, основные типы современных фрез, выбор их конструктивных элементов и методики расчетов;

глава 5: назначение, конструктивные элементы, схемы резания протяжек для обработки различных поверхностей — отверстий стандартизированной и произвольной формы, пазов, плоскостей и др.;

глава 6: процессы и инструменты для нарезания резьб — метчики, резцы, гребенки, фрезы и др.;

глава 7: инструменты для нарезания зубчатых профилей методами копирования и обкатки и общие положения проектирования наиболее характерных из них — червячных фрез и долбяков;

глава 8: материалы для абразивно-алмазных инструментов, виды абразивных и алмазных кругов и инструментов для отделочной обработки;

глава 9: современные методы обработки материалов (электроэрозионная, электрохимическая, лазерная), особенности конструкций режущих инструментов для автоматизированных производств, а также способы улучшения режущих свойств инструментов.

1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

1.1. Сущность и виды обработки материалов резанием

Обработка материалов резанием — наиболее широко используемая технология в производстве машин. Ее характерными особенностями являются универсальность, легкость приспособления для обработки конкретных поверхностей в различных типах производства, возможность автоматизации процесса и оперативного вмешательства в ход обработки и ряд других. В зависимости от формы обработанной поверхности и используемого оборудования обработку резанием можно подразделить на следующие виды:

1) *точение, токарная обработка* — одна из основных операций обработки резанием наружных, внутренних и торцовых поверхностей вращения токарными резцами соответствующего назначения. Выполняется на металлорежущих станках токарной группы, обычно при вращательном движении изделия и поступательном движении резца. Процесс механической обработки внутренних поверхностей расточными резцами с целью увеличения диаметра называется *расточиванием*;

2) **обработка отверстий осевыми инструментами** — формирование отверстий различной формы в сплошном материале или увеличение диаметра уже имеющегося отверстия с помощью различных режущих инструментов. Различают:

- **сверление** — процесс получения сквозных и глухих отверстий в сплошном материале на сверлильных, токарных, револьверных, расточных, агрегатных и других станках, а также при помощи ручных сверлильных машин. Главное движение при сверлении — вращательное, движение подачи — поступательное. При работе на сверлильных станках оба движения осуществляет сверло, при работе на других станках вращение совершается обрабатываемой заготовкой, поступательное осевое движение — сверлом;

- **зенкерование** — способ обработки поверхностей отверстий, предварительно просверленных либо полученных горячей или холодной штамповкой и литьём. Применяется при обработке цилиндрических отверстий, углублений под головки или шейки болтов и винтов, торцовых поверхностей бобышек под шайбы, упорные кольца и т.п. Зенкерование является промежуточной операцией после сверления перед развёртыванием; повышает точность и снижает шероховатость поверхности отверстия, так как зенкер, в отличие от сверла, имеет больше режущих лезвий. Широко применяется при чистовой и получистовой обработке отверстий на сверлильных, револьверных и расточных станках;

- **развёртывание** — одна из разновидностей обработки отверстий многолезвийным режущим инструментом — развёрткой. В результате развёртывания обеспечивается высокая точность и малая шероховатость поверхности отверстия;

3) **фрезерование** — обработка открытых (плоскостей, наружных пазов) или замкнутых (внутренние карманы и пазы) поверхностей различной формы с помощью соответствующих фрез на фрезерных станках; фреза при этом совершает вращательное, а заготовка — преимущественно поступательное движение;

4) **протягивание** — обработка круглых или фасонных отверстий, а также пазов, плоскостей и наружных поверхностей сложной формы на протяжных станках многолезвийным режущим инструментом — протяжкой. Применение протягивания целесообразно при обработке больших партий деталей, т.е. в крупносерийном и массовом производстве (ввиду сложности изготовления и высокой стоимости протяжек);

5) **обработка резьбы** — процесс формирования наружных и внутренних резьб различного профиля и шага с помощью резьбонарезных или резьбонакатных инструментов; осуществляется на токарных, сверлильных, фрезерных и специализированных резьбонарезных и резьбонакатных станках;

6) **зубонарезание** — процесс обработки зубьев зубчатых колёс и других деталей, имеющих зубья, на зубообрабатывающем станке путем снятия стружки зуборезным инструментом. При черновом зубонарезании снимается большая часть припуска, а профиль зуба еще не получает окончательной формы. Чистовое зубонарезание либо бывает окончательным процессом, либо после него производят упрочняющую обкатку зубьев, термическую обработку с последующим зубошлифованием или доводкой. Черновое зубонарезание осуществляют методами обкатки или копирования, чистовое — обычно методом обкатки. При копировании инструментом являются фрезы (дисковая или пальцевая), которые в радиальной плоскости имеют профиль, соответствующий впадине между зубьями нарезаемого зубчатого колеса. При обкатке используют червячные фрезы, зубонарезные гребенки, долбяки, зубострогальные резцы с режущей частью, производящая поверхность которых представляет собой как бы профиль зуба сопряженной зубчатой рейки (колеса). Профиль зуба, получаемый после зубонарезания по методу обкатки, близок к огибающей линии, образованной последовательными положениями режущей кромки инструмента;

7) **абразивная обработка** — окончательная обработка поверхностей различной формы с помощью шлифовальных кругов, брусков, сегментов и других абразивных инструментов на соответствующих металлорежущих станках. Наиболее распространенный способ абразивной обработки — **шлифование**, обеспечивающее высокую точность обработки и малую шероховатость обработанной поверхности.

Все перечисленные виды обработки основаны на использовании механической энергии для изменения размеров и формы обрабатываемых деталей. В последние годы наряду с традиционными процессами обработки резанием деталей из различных материалов используется также ряд высокопроизводительных видов обработки, основанных на использовании немеханической энергии:

- **электроэрозионная обработка** — основана главным образом на тепловом действии электрического тока в зазоре между инст-

рументом (электродом) и деталью. Различают электроэрозионную обработку размерную, основанную на эрозии (разрушении материалов электрическим разрядом), и электроэрозионную обработку для упрочнения поверхности или покрытия ее защитным слоем;

- *электрохимическая обработка* — основана на удалении слоя материала с помощью электрохимических процессов, происходящих в среде электролита;

- *лазерная обработка* — основана на удалении определенного объема материала детали или ее разрезке с помощью лазерного излучения. При этом используется термическое действие светового излучения, вызываемое его поглощением в обрабатываемом материале. Сами свойства обрабатываемого материала, например высокая твердость, слабо влияют на интенсивность процесса.

Указанные способы обработки позволяют обрабатывать поверхности весьма сложной формы в деталях из различных материалов, в том числе труднообрабатываемых. Однако, несмотря на несомненную эффективность, их доля в общем объеме механической обработки все еще весьма мала. Это связано со сложностью и высокой стоимостью используемого оборудования, отсутствием доступных рекомендаций по выбору технологических параметров обработки и технологических сред, проблемами с утилизацией отходов производства и т.п. Поэтому основное внимание в дальнейшем будет уделено традиционным видам обработки резанием.

1.2. Главные и вспомогательные движения при обработке резанием. Поверхности обработки

В настоящее время в промышленности используются режущие инструменты, отличающиеся друг от друга по кинематике движения, виду оборудования, способу изготовления, материалу режущей части, конструктивному исполнению и т.д. Однако в каждом из них можно выделить один или несколько клинооб-

разных режущих элементов, служащих для проникновения в материал заготовки и отделения слоя материала (припуска). Такой элемент называется *лезвием*. Часть режущего инструмента, содержащая лезвия, называется *рабочей*. Для установки и крепления режущего инструмента в технологическом оборудовании или приспособлении служит *крепежная часть*.

Форма режущего лезвия бывает различной и обуславливает геометрические параметры режущей части инструмента. На основании понятий и определений геометрии простейшего инструмента, например токарного резца, имеющего в своем сечении режущий клин, изучают особенности геометрии более сложных инструментов.

На заготовке в ходе обработки различают три поверхности: *обрабатываемую*, которая частично или полностью удаляется при обработке; *обработанную*, образованную на заготовке в результате обработки; *поверхность резания*, образуемую режущей кромкой в результирующем движении резания. Поверхность резания является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями (рис. 1.1). В процессе обработки детали образуется стружка. Это деформированный и отделенный в результате обработки поверхностный слой материала заготовки.

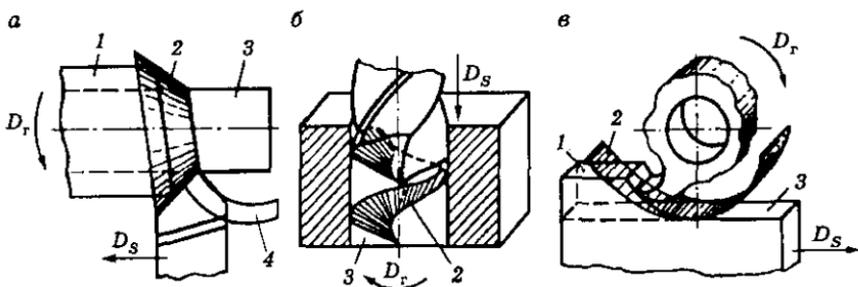


Рис. 1.1. Поверхности обработки и стружка при точении (а), сверлении (б), цилиндрическом фрезеровании (в):

1 — обрабатываемая; 2 — резания; 3 — обработанная; 4 — стружка

При обработке резанием различают главное движение резания и движение подачи (рис. 1.2).

Главное движение резания D_r — прямолинейное поступательное или вращательное движение заготовки либо режущего

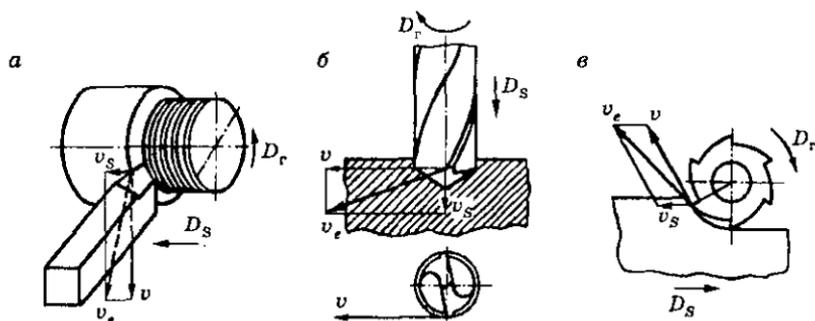


Рис. 1.2. Элементы движений в процессе резания:
 а — при обтачивании; б — сверлении; в — цилиндрическом фрезеровании

инструмента, происходящее в процессе резания с наибольшей скоростью v .

Движение подачи D_S — прямолинейное поступательное или вращательное движение инструмента либо заготовки, скорость которого v_S меньше скорости главного движения резания. Движение подачи позволяет распространить отделение слоя материала на всю обработанную поверхность. Движения подачи могут различаться по направлениям. Так, при точении перемещение резца параллельно оси заготовки называют *продольной подачей* (рис. 1.3, а), а перпендикулярно к оси — *поперечной* (рис. 1.3, б, в). При этом образуется соответственно деталь цилиндрической формы или плоскость, перпендикулярная к оси центров. Фасонные резцы при поперечной подаче создают различные поверхности вращения (рис. 1.3, в). При перемещении резца под некоторым углом к оси центров образуется коническая поверхность (рис. 1.3, г). Перемещение резца может осуществляться по заданной кривой в соответствии с программой или по копиру в плоскости, проходящей через ось центров; при этом получается поверхность с криволинейной образующей (рис. 1.3, д).

Сложение величин v и v_S позволяет определять скорость результирующего движения резания v_e (см. рис. 1.2), причем движений, в частности движений подачи, может быть несколько. В зависимости от величины и направления v и v_S образуются поверхности различной формы (цилиндрические, конические, фасонные). Сочетание движений, сообщаемых механизмом станка

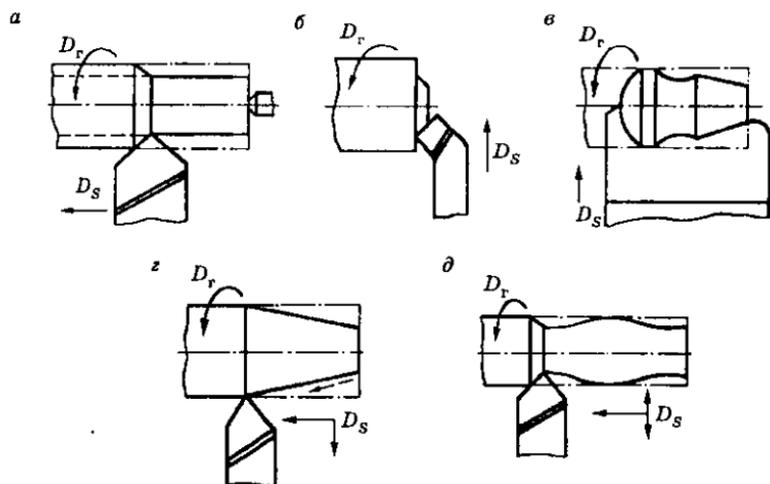


Рис. 1.3. Главное движение и движение подачи при обработке точением поверхностей деталей:

a — цилиндрической; *б* — торцовой; *в* — фасонной; *г* — конической; *д* — криволинейной

в процессе резания инструменту и обрабатываемой детали, представляет собой кинематическую схему резания. В зависимости от количества и характера сочетаемых элементарных движений кинематические схемы резания были систематизированы по группам:

- 1) одно прямолинейное движение;
- 2) два прямолинейных движения;
- 3) одно вращательное движение;
- 4) одно вращательное и одно прямолинейное движение;
- 5) два вращательных движения;
- 6) два прямолинейных и одно вращательное движение;
- 7) два вращательных и одно прямолинейное движение;
- 8) три вращательных движения.

Любой реальный процесс резания входит в одну из этих групп. Например, строгание, протягивание — в первую группу; точение, сверление, фрезерование плоских поверхностей — в четвертую; фрезерование тел вращения — в пятую; нарезание зубчатых колес методом обкатки — в седьмую и т.д. Примеры реализации различных кинематических схем резания приведены в последующих разделах.

1.3. Современные инструментальные материалы

Эксплуатационные характеристики режущих инструментов в значительной степени зависят от качества материала, из которого эти инструменты изготовлены. Материалы, предназначенные для режущих инструментов, должны по ряду показателей значительно превосходить материалы, применяемые в машиностроении для изготовления различных деталей. Ниже приведены основные требования, предъявляемые к инструментальным материалам.

1. Инструментальный материал должен иметь высокую твердость в состоянии поставки или достигаемую в результате его термической обработки — не менее 62...65 HRC по Роквеллу (шкала С).

2. При резании металлов выделяется значительное количество теплоты, и режущая часть инструмента нагревается. Температура рабочих поверхностей и режущих кромок инструмента зависит от условий, при которых ведется обработка, и может достигать нескольких сот градусов. Необходимо, чтобы при значительных температурах резания твердость поверхностей инструментов существенно не уменьшалась. Поэтому инструментальный материал должен обладать высокой теплостойкостью, т.е. способностью сохранять высокую твердость при повышенных температурах и исходную твердость после охлаждения.

3. Наряду с теплостойкостью инструментальный материал должен иметь высокую износостойкость при повышенной температуре, т.е. обладать хорошей сопротивляемостью истиранию обрабатываемым материалом.

4. Важным требованием является достаточно высокая прочность инструментального материала. Сочетание высокой твердости материала рабочей части инструмента с его значительной хрупкостью приводит к поломке инструмента и выкрашиванию режущих кромок.

5. Инструментальный материал должен обладать технологическими свойствами, обеспечивающими оптимальные условия изготовления из него инструментов. Для инструментальных сталей — это хорошая обрабатываемость резанием и давлением,

благоприятные особенности термической обработки (малая чувствительность к перегреву и обезуглероживанию, хорошие закаливается и прокаливаемость, минимальные деформирование и образование трещин при закалке и т.д.), хорошая шлифуемость после термической обработки.

Для твердых сплавов первые два требования менее существенны, но зато особое значение приобретает хорошая шлифуемость, а также отсутствие трещин и других дефектов, которые возникают в твердом сплаве после припайки пластин, при шлифовании и заточке инструмента.

Углеродистые и легированные инструментальные стали. Номенклатура инструментальных материалов разнообразна. Ранее других материалов для изготовления режущих инструментов начали применять *углеродистые инструментальные стали* марок У7, У7А...У13, У13А. Помимо железа и углерода эти стали содержат 0,2...0,4 % марганца. Инструменты из углеродистых сталей обладают достаточной твердостью при комнатной температуре, но *небольшой теплостойкостью*, так как при сравнительно невысоких температурах (200...250 °С) их твердость резко уменьшается.

Легированные инструментальные стали по химическому составу отличаются от углеродистых повышенным содержанием кремния или марганца либо наличием одного или нескольких легирующих элементов: хрома, никеля, вольфрама, ванадия, кобальта, молибдена. Для режущих инструментов используются низколегированные стали марок 9ХФ, 11ХФ, 13Х, В2Ф, ХВ4, ХВСГ, ХВГ, 9ХС и др. Эти стали обладают более высокими технологическими свойствами — лучшей *закаливается и прокаливаемостью*, меньшей склонностью к короблению, но *теплостойкость* их практически равна теплостойкости углеродистых сталей (350...400 °С), поэтому они используются для изготовления ручных инструментов (разверток) или инструментов, предназначенных для обработки на станках с низкими скоростями резания (мелкие сверла, развертки).

Быстрорежущие инструментальные стали. Из группы высоколегированных сталей для изготовления режущих инструментов используются быстрорежущие стали с высоким содержанием вольфрама, молибдена, кобальта, ванадия. Современные быстрорежущие стали можно разделить на три группы (ГОСТ 19265–73).

К *сталим нормальной теплостойкости* относятся вольфрамовые Р18, Р12, Р9 и вольфрамомолибденовые Р6М5, Р6М3, Р8М3. Эти стали имеют твердость в закаленном состоянии 62...65 HRC, предел прочности при изгибе 2900...3400 МПа, ударную вязкость 2,7...4,8 Дж/м² и теплостойкость 600...650 °С. Указанные стали получили наиболее широкое распространение при изготовлении режущих инструментов. Они используются при обработке конструкционных сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов, пластмасс.

Применяются также быстрорежущие стали, дополнительно легированные азотом (Р6АМ5, Р18А и др.), которые являются модификациями обычных быстрорежущих сталей. Легирование азотом повышает режущие свойства инструмента на 20...30 %, твердость — на 1–2 единицы HRC.

Стали повышенной теплостойкости характеризуются повышенным содержанием углерода (10Р8М3, 10Р6М5), ванадия (Р12Ф3, Р2М3Ф8, Р9Ф5), кобальта (Р18Ф2К5, Р6М5К5, Р9К5, Р9К10, Р9М4К8Ф и др.). Твердость сталей в закаленном состоянии достигает 65...69 HRC, они имеют более высокую теплостойкость (до 620...670 °С). Это дает возможность использовать их для обработки жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности и закаленных. Период стойкости инструментов из таких сталей в 3–5 раз выше, чем из сталей Р18, Р6М5.

Стали высокой теплостойкости характеризуются пониженным содержанием углерода, но весьма большим количеством легирующих элементов (В11М7К23, В14М7К25, 3В20К20Х4). Они имеют твердость 68...69 HRC и теплостойкость 700...720 °С. Наиболее рациональная область их использования — резание труднообрабатываемых материалов и титановых сплавов. В последнем случае период стойкости инструментов из этих сталей в 30–80 раз выше, чем из стали Р18, и в 8–15 раз выше, чем из твердого сплава ВК8. При резании конструкционных сталей и чугунов период стойкости возрастает менее значительно (в 3–8 раз).

Находят применение также маловольфрамовые (Р2М5, Р3М3Ф4К5, Р2М3Ф8, 11Р3АМ3Ф2) и безвольфрамовая (11М5Ф) стали. Эксплуатационные свойства указанных сталей близки к свойствам традиционных быстрорежущих сталей соответствующих групп.

Для повышения качества быстрорежущих сталей перспективным является получение их методами порошковой металлургии. Стали Р6М5К5-П, Р9М4К8-П, Р12М3Ф3К10-П (П—порошковая) и другие имеют весьма однородную мелкозернистую структуру, хорошо шлифуются, меньше деформируются при термообработке, отличаются стабильностью эксплуатационных свойств. Период стойкости режущих инструментов из таких сталей значительно возрастает (от 1,5 до нескольких раз).

Твердые сплавы. Эти сплавы получают методами порошковой металлургии в виде пластин или коронок. Основными компонентами таких сплавов являются карбиды вольфрама, титана, тантала и ниобия, мельчайшие частицы которых соединены посредством сравнительно мягких и менее тугоплавких кобальта или никеля в смеси с молибденом (табл. 1.1, 1.2).

Твердые сплавы имеют высокую твердость — 88...92 HRA (71...75 HRC) и теплостойкость до 850...1000 °С. Это позволяет работать со скоростями резания в 3–4 раза большими, чем при использовании инструментов из быстрорежущих сталей.

Таблица 1.1

Марки, химический состав и свойства
вольфрамсодержащих твердых сплавов

Группа сплавов	Марка сплава	Состав сплава, %				Физико-механические свойства	
		Карбид вольфрама	Карбид титана	Карбид тантала	Кобальт	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Твердость HRA, не менее
ВК	ВК3-М	97	—	—	3	1176	91,0
	ВК4	96	—	—	4	1519	89,5
	ВК4-В	96	—	—	4	1470	88,0
	ВК6	94	—	—	6	1519	88,5
	ВК6-М	94	—	—	6	1421	90,0
	ВК6-ОМ	92	—	2	6	1274	90,5
	ВК6-В	94	—	—	6	1666	87,5
	ВК8	92	—	—	8	1666	87,5
	ВК8-В	92	—	—	8	1813	86,5

Окончание табл. 1.1

Группа сплавов	Марка сплава	Состав сплава, %				Физико-механические свойства	
		Карбид вольфрама	Карбид титана	Карбид тантала	Кобальт	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Твердость HRA, не менее
ТК	Т5К10	85	5	—	10	1421	88,5
	Т15К6	79	15	—	6	1176	90,0
	Т14К8	78	14	—	8	1274	89,5
	Т30К4	66	30	—	4	980	92,0
ТТК	ТТ7К12	81	4	3	12	1666	87,0
	ТТ8К6	84	8	2	6	1323	90,5
	ТТ10К8-Б	82	3	7*	8	1617	89,0
	ТТ20К9	71	8	12	9	1470	89,0

* В смеси с карбидами ниобия.

Таблица 1.2

Марки, химический состав и свойства безвольфрамовых твердых сплавов

Марка сплава	Состав сплава, %					Физико-механические свойства	
	Карбиды титана и ниобия	Карбонитриды титана	Карбид титана	Никель	Молибден	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Твердость HRA, не менее
ТМ-1	90	—	—	5,0	5,0	764	92
ТМ-3	64	—	—	21,0	15,0	1176	89
ТН-20	—	—	79	15,0	6,0	1050	90
КНТ-16	—	74	—	19,5	6,5	1200	89

Применяемые в настоящее время твердые сплавы делятся:

1) на *вольфрамовые сплавы* группы ВК (ВК3, ВК3-М, ВК4, ВК6, ВК6-М, ВК6-ОМ, ВК8 и др.). В условном обозначении цифра показывает процентное содержание кобальта. Например, обозна-

чение ВК8 показывает, что в сплаве 8 % кобальта и 92 % карбидов вольфрама. Буквами М и ОМ обозначается мелкозернистая и особо мелкозернистая структура;

2) *титановольфрамовые сплавы* группы ТК (Т5К10, Т15К6, Т14К8, Т30К4, Т60К6 и др.). В условном обозначении цифры, стоящие после буквы Т, показывают процентное содержание карбида титана, после буквы К — кобальта, остальное (до 100 %) — карбид вольфрама;

3) *титанотанталовольфрамовые сплавы* группы ТТК (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9 и др.). В условном обозначении цифры, стоящие после букв ТТ, показывают процентное содержание карбидов титана и тантала, после буквы К — кобальта, остальное — карбид вольфрама;

4) *безвольфрамовые твердые сплавы* (ТМ-1, ТМ-3, ТН-20, КНТ-16, ТС20ХН), состав которых приведен в табл. 1.2. Обозначения этой группы твердых сплавов условные.

Твердые сплавы выпускаются в виде стандартизованных пластин, которые припаиваются, приклеиваются или крепятся механически к державкам из конструкционной стали. Выпускаются также инструменты, рабочая часть которых целиком выполнена из твердого сплава (монокристаллы).

Правильный выбор марки твердого сплава обеспечивает эффективную эксплуатацию режущих инструментов. Для конкретного случая обработки сплав выбирают исходя из оптимального сочетания его теплостойкости и прочности. Например, сплавы группы ТК имеют более высокую теплостойкость, чем сплавы ВК. Изготовленные из них инструменты могут использоваться при высоких скоростях резания, поэтому их широко применяют при обработке сталей.

Инструменты из твердых сплавов группы ВК применяют при обработке деталей из конструкционных сталей в условиях низкой жесткости технологической системы, при прерывистом резании, работе с ударами, а также при обработке хрупких материалов типа чугуна. Это обусловлено повышенной прочностью данной группы твердых сплавов и невысокими температурами в зоне резания. Такие сплавы используются также при обработке деталей из высокопрочных, жаропрочных и нержавеющей сталей, титановых сплавов.

Введение в твердый сплав карбида тантала или карбидов тантала и ниобия (ТТ10К8-В) повышает его прочность. Поэтому трех- и четырехкарбидные твердые сплавы применяются для оснащения инструментов, работающих с ударами и по загрязненной корке. Однако температура теплостойкости этих сплавов ниже, чем у двухкарбидных. Из твердых сплавов с существенно улучшенной структурой следует отметить особомелкозернистые, применяемые для обработки материалов с большой истирающей способностью. Сплавы ОМ обладают плотной, особомелкозернистой структурой, а также имеют малый (до 0,5 мкм) размер зерен карбидов вольфрама. Последнее обстоятельство позволяет затачивать и доводить изготовленный из них инструмент с наименьшими радиусами режущих кромок. Инструменты из сплавов этой группы применяются для чистовой и получистовой обработки деталей из высокопрочных вязких сталей с повышенной склонностью к наклепу.

Незначительная добавка в состав сплавов группы ОМ карбида тантала и кобальта способствует повышению их теплостойкости, что позволяет использовать эти сплавы при изготовлении инструментов, предназначенных для черновой обработки деталей из различных сталей. Весьма эффективна замена карбида тантала карбидом хрома. Это обеспечивает получение сплавов с мелкозернистой однородной структурой и высокой износостойкостью. Представителем таких материалов является сплав ВК10-ХОМ.

Сплавы с низким процентным содержанием кобальта (Т30К4, ВК3, ВК4) обладают меньшей ударной вязкостью и применяются для изготовления инструментов, срезающих тонкие стружки на чистовых операциях. Наоборот, сплавы с большим содержанием кобальта (ВК8, Т14К8, Т5К10) являются более вязкими и применяются при снятии стружек большого сечения на черновых операциях.

В настоящее время в промышленности широко используют инструменты, оснащенные твердыми сплавами зарубежного производства. В этом случае принято обозначение твердых сплавов по ISO 513:2004. Такие сплавы включают три группы — Р, К и М, состоящие из нескольких подгрупп, например Р01, Р10, Р20, ..., Р40 (табл. 1.3). Чем выше индекс в группе, тем ниже износостойкость сплава и уровень допустимых скоростей резания и тем выше прочность и допустимые сечения среза.

Таблица 1.3

Марки и области применения твердых сплавов по ISO

Группа	Марка сплава	Область применения
Р	01	Чистовая и получистовая обработка стали и стального литья при благоприятных условиях. Рекомендуются высокие скорости резания и небольшие подачи без использования СОЖ
	10	
	15	
	20	Чистовая и получистовая обработка стали, стального литья, ковкого и модифицированного чугунов, образующих сливную стружку
	25	
	30	
	35	Черновая и получистовая обработка стали, стального литья, ковкого и модифицированного чугунов. Относительно высокие скорости резания и подачи
40		
50		
М	10	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сплавов. Сравнительно высокие скорости резания и небольшие подачи
	20	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сплавов
	30	
	40	Черновая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сплавов по корке и окалине. Рекомендуются низкие скорости резания, значительные подачи
К	01	Чистовая и получистовая обработка легированного чугуна, медных сплавов
	05	
	10	Чистовая и получистовая обработка серого чугуна, обработка ковкого и модифицированного чугунов
	15	
	20	
	25	Обработка чугунов и медных сплавов в неблагоприятных условиях. Рекомендуются невысокие скорости резания, значительные подачи
30		

В последнее время в результате совершенствования химического состава твердых сплавов увеличено количество их групп и принята новая классификация (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Классификация и области применения* твердых сплавов

Обозначение группы твердых сплавов	Группа обрабатываемых материалов
P	Углеродистые и легированные конструкционные и инструментальные стали
M	Нержавеющие стали аустенитного класса
K	Чугуны серые и ковкие
N	Медь, алюминий и их сплавы, пластмассы
S	Жаропрочные и титановые сплавы
H	Стали и чугуны в закаленном состоянии

* В зависимости от вида обработки (точение, сверление, фрезерование) области применения твердых сплавов могут изменяться.

Минералокерамика. Среди современных инструментальных материалов особого внимания заслуживает минералокерамика, которая не содержит дорогостоящих и дефицитных элементов. Основу ее составляют оксид алюминия с небольшой добавкой (0,5...1 %) оксида магния. Высокая твердость минералокерамики, теплостойкость до 1200 °С, химическая инертность к металлам, сопротивление окислению во многом превосходят эти же параметры твердых сплавов. Однако минералокерамика уступает этим сплавам по теплопроводности, имеет более низкий предел прочности на изгиб.

Современная минералокерамика по прочности приближается к наиболее износостойким твердым сплавам. Минералокерамику на основе оксида алюминия можно разделить на три группы:

- 1) чисто оксидная керамика (белая), основу которой составляет оксид алюминия (до 99,7 %) с незначительными примесями;
- 2) керамика, представляющая собой оксид алюминия с добавлением металлов (титан, ниобий и др.);
- 3) оксидно-карбидная (черная) керамика — оксид алюминия с добавлением карбидов тугоплавких металлов (титана, вольфрама, молибдена) для повышения ее прочностных свойств и твердости.

В настоящее время выпускается оксидная керамика ЦМ-332, ВО-13 и оксидно-карбидная ВЗ, ВОК-60, ВОК-71, в состав которой входит до 40 % карбидов титана, вольфрама и молибдена.

Наряду с материалами на основе оксида алюминия выпускаются материалы на основе нитрида кремния — силинит-Р и кортинит ОНТ-20 (с добавками оксида алюминия и некоторых других веществ). Физико-механические свойства режущей минералокерамики, выпускаемой в странах СНГ, приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

**Физико-механические свойства минералокерамики
производства стран СНГ**

Марка	Плотность, г/см ³ , не менее	Твердость, HRA	Предел прочности на изгиб, МПа, не менее
ЦМ-332	3,85	90...92	295...350
ВО-13	3,95	90...92	450...500
ОНТ-20	4,30	92...94	500...650
ВЗ	4,50	92...94	560...600
ВОК-60	4,20	92...94	560...600
ВОК-71	4,20	92...93	635...700
Силинит-Р	—	94...96	500...700

Высокие режущие свойства инструментов из минералокерамики проявляются при скоростной обработке сталей и высокопрочных чугунов, причем чистовое и получистовое точение и фрезерование повышают производительность обработки деталей до 2 раз при одновременном возрастании периодов стойкости инструментов до 5 раз по сравнению с обработкой инструментами из твердого сплава. Минералокерамика выпускается в виде неплетачиваемых пластин, что существенно облегчает условия ее эксплуатации.

Сверхтвердые инструментальные материалы. Одним из направлений совершенствования режущих свойств инструментов, позволяющих повысить производительность труда при механической обработке, является увеличение твердости и теплостойкости инструментальных материалов. Наиболее перспективными в этом отношении являются синтетические сверхтвердые материалы (СТМ) на основе алмаза или нитрида бора.

Алмазы и алмазные инструменты широко используются при обработке деталей из различных материалов. Для алмазов характерны исключительно высокие твердость и износостойкость.

По абсолютной твердости алмаз в 4–5 раз тверже твердых сплавов, а его износостойкость в десятки и сотни раз превышает износостойкость других инструментальных материалов при обработке цветных сплавов и пластмасс. Кроме того, вследствие высокой теплопроводности алмазы лучше отводят теплоту из зоны резания, что способствует гарантированному получению деталей без прижогов на поверхности. Однако алмазы весьма хрупки, что сильно сужает область их применения.

При изготовлении режущих инструментов основное применение получили искусственные алмазы, которые по своим свойствам близки к естественным. При больших давлениях и температурах в искусственных алмазах удается получить такое же расположение атомов углерода, как и в естественных. Масса одного искусственного алмаза обычно составляет $1/8 \dots 1/10$ карата (1 карат — 0,2 г). Вследствие малости размеров искусственных кристаллов они непригодны для изготовления таких инструментов, как сверла, резцы и др., а поэтому применяются при изготовлении порошков для алмазных шлифовальных кругов и притирочных паст.

Лезвийные алмазные инструменты выпускаются на основе поликристаллических материалов типа АСПК — «карбонадо» или АСПБ — «баллас». Эти инструменты имеют длительные размерные периоды стойкости и обеспечивают высокое качество обработанной поверхности. Применяются они при обработке титановых, высококремнистых алюминиевых сплавов, стеклопластиков и пластмасс, твердых сплавов и других материалов.

Алмаз как инструментальный материал имеет существенный недостаток: при повышенной температуре он вступает в химическую реакцию с железом и теряет работоспособность. Для того чтобы обрабатывать стали, чугуны и другие материалы на основе железа, созданы сверхтвердые материалы, химически инертные к нему. Такие материалы получены по технологии, близкой к технологии получения алмазов, но в качестве исходного вещества используется не графит, а нитрид бора.

Поликристаллы плотных модификаций нитрида бора превосходят по теплостойкости все материалы, применяемые для лез-

вийного инструмента: алмаз — в 1,9 раза, быстрорежущую сталь — в 2,3, твердый сплав — в 1,7, минералокерамику — в 1,2 раза. Эти материалы изотропны (их прочность в различных направлениях одинакова), обладают микротвердостью, близкой к твердости алмаза, повышенной теплостойкостью, высокой теплопроводностью и химической инертностью по отношению к углероду и железу.

Поликристаллы алмаза или плотных модификаций нитрида бора могут впаиваться в державки из конструкционной стали либо иметь форму сменных многогранных пластин (круглых, квадратных, треугольных) небольших размеров. В настоящее время наиболее часто используются двухслойные пластины с размерами, аналогичными пластинам из твердого сплава: рабочий слой выполняется из СТМ, а подложка — из твердого сплава.

Характеристики некоторых из рассматриваемых материалов, в настоящее время получивших название «композит», приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

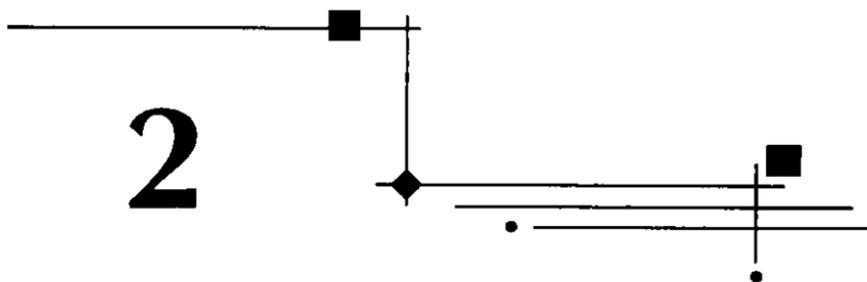
Сравнительные характеристики СТМ на основе нитрида бора

Марка материала	Твердость HV, ГПа	Теплостойкость, °С
Композит 01	60...80	1100...1300
Композит 02	60...90	900...1000
Композит 03	60	1000
Композит 05	70	1000
Композит 09	60...90	1500
Композит 10	50...90	750...850

Эффективность применения лезвийных инструментов из различных марок композитов связана с совершенствованием конструкции инструментов и технологии их изготовления и с определением рациональной области их использования: композиты 01 и 02 применяют для тонкого и чистового точения и фрезерования без ударов деталей из закаленных сталей твердостью 54...69 HRC, чугунов и твердых сплавов ВК15, ВК20 и ВК25 с подачей до 0,20 мм/об и глубиной резания до 0,8 мм; композит 05 — для чистового и получистового точения без ударов деталей из закаленных ста-

лей твердостью 40...57 HRC, чугунов твердостью до 300 HB с подачей до 0,25 мм/об и глубиной до 2,5 мм; композит 10 — для тонкого, чистового и получистового точения и фрезерования с ударами деталей из закаленных сталей твердостью не более 58 HRC, чугунов любой твердости, сплавов BK15, BK20, BK25 с подачей до 0,15 мм/об и глубиной резания до 0,6 мм. При этом период стойкости инструментов возрастает в десятки раз по сравнению с другими инструментальными материалами.

2



ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ТОЧЕНИЕМ

2.1. Геометрия токарного резца

Рабочая часть любого режущего инструмента состоит из одного или многих режущих лезвий. На лезвии затачиваются: *передняя поверхность 1*, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой; *главная задняя поверхность 3*, контактирующая с поверхностью резания; *вспомогательная задняя поверхность 5*, обращенная к обработанной поверхности и контактирующая с ней (рис. 2.1).

При пересечении передней и главной задней поверхностей образуется *главная режущая кромка 2*, а передней и вспомогательной задней — *вспомогательная режущая кромка 6*. Главной режущей кромкой формируется большая сторона сечения срезаемого слоя, а вспомогательной — меньшая. Вспомогательных кромок может быть две. Режущие кромки никогда не бывают абсолютно острыми: образующие их поверхности сопрягаются по радиусу округления ρ .

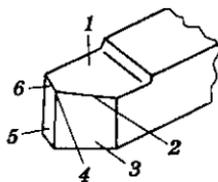


Рис. 2.1. Рабочие поверхности и режущие кромки резца

Место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок (рис. 2.2) называется *вершиной режущего лезвия* 4. Сопряжение бывает острозаточенное, по дуге окружности радиусом r_b ($r_b = 0,5 \dots 2$ мм) или по переходной кромке под углом $\varphi_0 = \varphi/2$, где φ — главный угол в плане (см. с. 30).

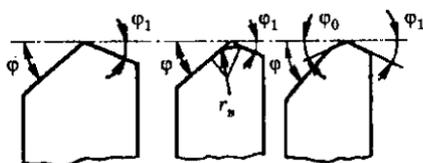


Рис. 2.2. Виды сопряжений главной и вспомогательной режущих кромок

По направлению подачи различают правые и левые резцы. У *правых* резцов при наложении на них сверху ладони правой руки так, чтобы четыре пальца были направлены к вершине резца, главная режущая кромка оказывается со стороны большого пальца (рис. 2.3, а). У *левых* резцов накладывается ладонь левой руки, а главная режущая кромка оказывается со стороны большого пальца этой руки (рис. 2.3, б). Можно сказать, что большой палец указывает направление продольной подачи резца при правом вращении шпинделя токарного станка.

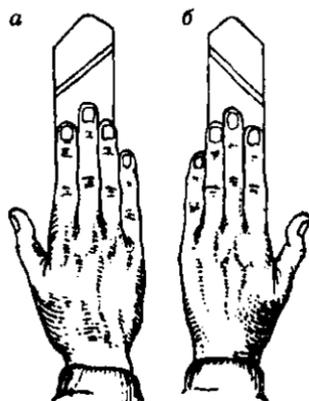


Рис. 2.3. Правый (а) и левый (б) резцы

По форме и расположению рабочей части резца относительно крепежной токарные резцы бывают (рис. 2.4):

- прямыми — ось резца прямая;
- отогнутыми — рабочая часть (головка) резца отогнута в сторону;
- с оттянутой головкой — рабочая часть уже крепежной (державки) и расположена симметрично или смещена (влево или вправо) относительно ее.

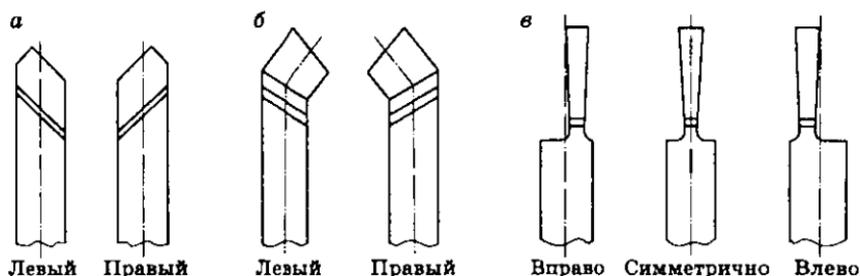


Рис. 2.4. Резцы с различной формой и расположением рабочей части: а — прямые; б — отогнутые; в — с оттянутой головкой

Расположение режущих кромок в пространстве определяет особенности режущего лезвия и оценивается относительно так называемых координатных плоскостей. Рассмотрим их на примере токарного резца (рис. 2.5).

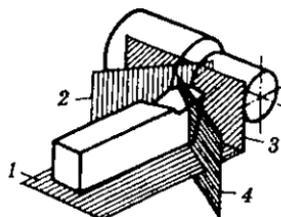


Рис. 2.5. Координатные плоскости резца

Для определения положения режущих кромок резца принимают следующие координатные плоскости: основная 1, резания 2, рабочая 3, главная секущая 4, а также вспомогательная секущая (на рисунке не показана). Координатные плоскости рассматривают

в различных системах координат. *Статическая система* имеет начало в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентирована относительно направления скорости главного движения резания, *кинематическая* — относительно направления скорости результирующего движения резания, *инструментальная* — относительно элементов режущего инструмента, принятых за базу.

Основной плоскостью (в статической системе координат) называется плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно к направлению скорости главного движения. У токарных резцов эта плоскость совпадает с их нижней опорной поверхностью.

Плоскостью резания называется плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная к основной плоскости. При установке токарного резца по линии центров станка и отсутствии подачи плоскость резания расположена перпендикулярно к нижней опорной поверхности резца.

Рабочая плоскость — это плоскость, в которой расположены векторы скоростей главного движения и движения подачи.

Так как углы резца двугранные, определяются они в секущих плоскостях. Эти плоскости должны быть перпендикулярны к ребру угла, которым является режущая кромка. *Главной секущей плоскостью 4* называется координатная плоскость, перпендикулярная к линии пересечения основной плоскости 1 и плоскости резания 2. В связи с тем что плоскость резания касательна к главной режущей кромке в рассматриваемой точке, главная секущая плоскость всегда нормальна к ее проекции на основную плоскость.

Вспомогательной секущей плоскостью называется плоскость, перпендикулярная (в рассматриваемой точке) к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

По расположению режущих кромок относительно координатных плоскостей определяют геометрию режущего лезвия (углы его заточки). Углы, определяемые в главной секущей плоскости, называются главными (они определяют режущий клин, отделяющий от припуска слой металла, превращаемый в стружку), во вспомогательной секущей плоскости — вспомогательными.

В главной секущей плоскости $N-N$ (рис. 2.6) рассматривают главные задний и передний углы, углы заострения и резания.

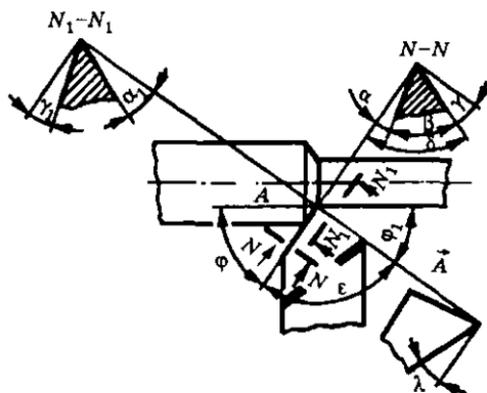


Рис. 2.6. Геометрические параметры резца

Главным задним углом α называется угол между главной задней поверхностью резца (или касательной к ней) и плоскостью резания. Для практических целей при обработке сталей рекомендуются следующие величины задних углов: $\alpha = 8^\circ$ для черновых резцов; $\alpha = 12^\circ$ для чистовых. Величины задних углов при обработке чугунов несколько меньше, чем при обработке сталей.

Угол заострения β называется угол между главной задней и передней поверхностями резца (или касательными к ним).

Главный передний угол γ — это угол в главной секущей плоскости между передней поверхностью резца (или касательной к ней) и основной плоскостью в рассматриваемой точке главной режущей кромки. Он имеет положительное значение, если передняя поверхность направлена вниз от основной плоскости, отрицательное значение, если передняя поверхность направлена вверх от нее, и равен нулю, если передняя поверхность параллельна основной плоскости.

Передний угол должен быть тем больше, чем меньше твердость и прочность обрабатываемого материала и больше его пластичность. Для инструментов из быстрорежущей стали при обработке мягких сталей угол γ равен $20 \dots 30^\circ$, сталей средней твердости — $12 \dots 15^\circ$, чугуна — $5 \dots 15^\circ$, алюминия — $30 \dots 40^\circ$. У твердосплавного инструмента передний угол делается меньшим, а иногда даже отрицательным в силу того, что этот инструментальный материал

менее прочный, чем быстрорежущая сталь. Однако уменьшение γ приводит к росту сил резания. Для снижения сил резания в этом случае на передней поверхности как твердосплавного, так и быстрорежущего инструмента затачивают отрицательную фаску (рис. 2.7). Значения γ , f и γ_f для твердосплавного инструмента равны соответственно 15° , $(1,0 \dots 1,5)S$ и -5° , а для быстрорежущего — 30° , $0,8S$ и 0° .

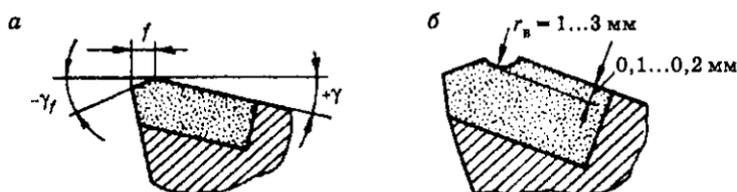


Рис. 2.7. Формы передней поверхности резца:
а — с отрицательной фаской; б — с отрицательной фаской и лункой

Углом резания δ называется угол между плоскостью резания и передней поверхностью резца (или касательной к ней).

Между этими углами существуют соотношения $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$, $\delta + \gamma = 90^\circ$.

Во вспомогательной секущей плоскости N_1-N_1 рассматривают вспомогательные задний α_1 и передний γ_1 углы. **Вспомогательный задний угол** — это угол в секущей плоскости, перпендикулярной к основной плоскости, между касательной к вспомогательной задней поверхности и плоскостью, проведенной через рассматриваемую точку перпендикулярно к основной плоскости.

В основной плоскости измеряются углы в плане. **Главным углом в плане** ϕ называется угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. Для резца он определяется проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. **Вспомогательным углом в плане** ϕ_1 называется угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. **Углом в плане при вершине** ϵ называется угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость. Между этими углами существует соотношение $\phi + \phi_1 + \epsilon = 180^\circ$.

Для увеличения времени работы инструмента надо стремиться к уменьшению угла ϕ . Однако чрезмерное его уменьшение оказывается вредным, так как при этом наблюдается резкое возрастание силы резания и увеличение вибраций. При обработке нежестких деталей главный угол в плане ϕ следует увеличивать до 90° . В отдельных случаях угол ϕ назначают из конструктивных соображений.

Главный угол в плане влияет также на шероховатость обработанной поверхности, поэтому при чистовой обработке рекомендуется использовать меньшие значения ϕ .

В плоскости резания измеряется *угол наклона главной режущей кромки* λ (рис. 2.8). Это угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью. Если вершина резца — низшая точка кромки, то угол λ — положительный, если высшая — отрицательный. Если режущая кромка параллельна основной плоскости, то угол λ равен нулю.

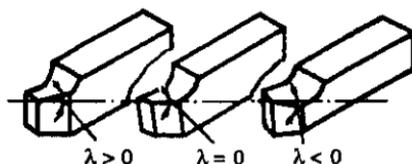


Рис. 2.8. Углы наклона главной режущей кромки резца

Рекомендуемые углы λ для чистовых и черновых резцов из быстрорежущей стали равны соответственно $0^\circ \dots (-4)^\circ$ и $5 \dots 10^\circ$, для твердосплавных резцов при работе их без ударов и с ударами — $5 \dots 10^\circ$ и $5 \dots 20^\circ$.

Все перечисленные углы резца соответствуют данным определениям, если вершина резца установлена на уровне оси вращения обрабатываемой детали и геометрическая ось стержня резца расположена перпендикулярно к оси вращения обрабатываемой детали. Нарушение этих условий приводит к изменению углов.

Наличие положительного либо отрицательного угла наклона режущей кромки также приводит к тому, что точки режущей кромки располагаются ниже или выше оси заготовки. Установка

режущей кромки ниже или выше оси заготовки иногда необходима и по условиям обработки. При этом будет изменяться положение касательной к поверхности резания (из-за выпуклости или вогнутости поверхности резания). Передний и задний углы установки будут соответственно равны (рис. 2.9):

$$\gamma_y = \gamma \pm \tau_\varphi; \quad \alpha_y = \alpha \pm \tau_\varphi.$$

Если $\varphi = 90^\circ$, то $\tau = \arcsin(h/R)$. Если $\varphi \neq 90^\circ$, то $\text{tg}\tau_\varphi = \text{tg}\tau \cos\varphi$.

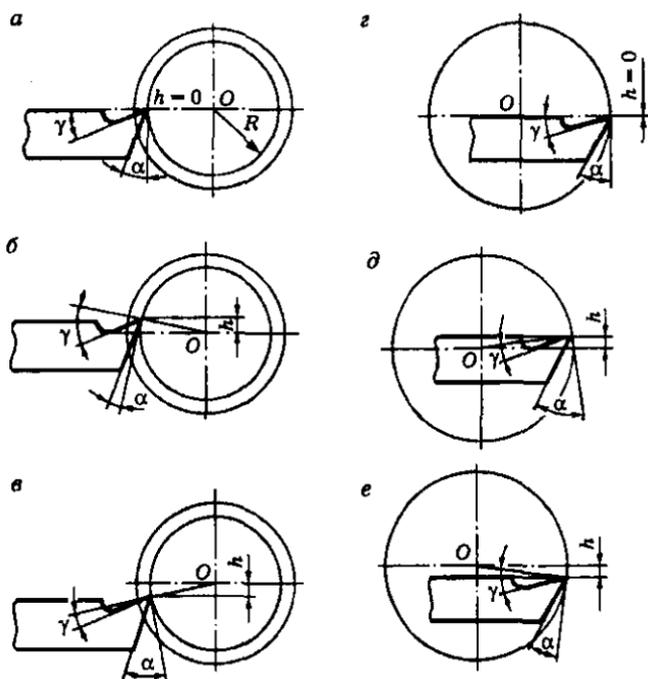


Рис. 2.9. Геометрические параметры реза в зависимости от положения его вершины относительно оси центров:

a–*c* — при наружном точении; *d*–*f* — при растачивании

2.2. Элементы режима резания и срезаемого слоя

Элементы режима резания. К элементам режима резания при точении относятся скорость главного движения, подача и глубина резания.

Скорость главного движения резания (скорость резания) v — это скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в направлении главного движения резания.

При точении, когда заготовка вращается с определенной круговой скоростью — частотой вращения n (об/мин), линейная скорость — скорость резания (м/мин) в разных точках режущей кромки будет разная. В расчетах принимается ее значение на максимальном диаметре:

$$v = \frac{\pi D n}{1000},$$

где D — наибольший диаметр поверхности резания, мм.

При продольном точении скорость резания постоянная, а при подрезании торца, прорезке канавок или отрезании при постоянной частоте вращения — переменная; наибольшее ее значение — у периферии заготовки.

В ходе обработки резец перемещается относительно заготовки с помощью движения подачи (см. гл. 1). Отношение расстояния, пройденного рассматриваемой точкой режущей кромки или заготовки вдоль траектории движения этой точки в движении подачи, к соответствующему числу циклов главного движения резания называется *подачей* S (рис. 2.10). Под циклом движения понимают полный оборот, ход или двойной ход режущего инструмента или заготовки. Соответственно при точении различают подачу за один оборот заготовки S_o (мм/об) и за 1 мин $S_m = S_o n$ (мм/мин). При токарной обработке подача может быть поперечная и продольная.

Глубина резания t — размер слоя, удаляемого за один проход, измеренный в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности. Глубина резания всегда перпендикулярна к направлению движения подачи.

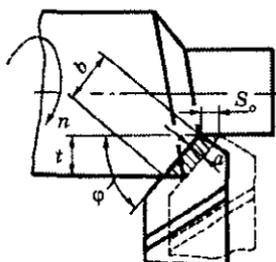


Рис. 2.10. Элементы режима резания и срезаемого слоя при точении

При продольном точении и растачивании глубина резания равна соответственно

$$t = \frac{D-d}{2} \text{ или } t = \frac{d-D}{2},$$

где D — диаметр заготовки; d — диаметр обработанной поверхности.

При прорезании канавок и отрезании заготовки t равна ширине прорезного или отрезного резца b .

Элементы срезаемого слоя. Глубина резания, частота вращения детали или инструмента и подача характеризуют процесс резания с технологической стороны — с точки зрения положения и движения инструмента, обеспечивающих процесс резания. Но при одной и той же подаче и глубине резания в зависимости от формы режущей кромки и ее расположения (углов в плане) изменяются ширина и толщина поперечного сечения срезаемого слоя, от которых зависят условия обработки.

Ширина срезаемого слоя, или ширина среза, b — длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания.

Толщина срезаемого слоя, или толщина среза, a — длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя.

Толщина и ширина среза представляют собой не толщину и ширину стружки, а размеры сечения среза до ее образования. Размеры стружки отличаются от размеров срезаемого слоя из-за усадки, происходящей вследствие деформации металла при резании. Толщина среза a измеряется в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, ширина среза b — вдоль режущей

кромки. При точении между толщиной среза и подачей на оборот, а также между глубиной резания и шириной среза существуют определенные соотношения:

$$a = S_o \sin \varphi; \quad b = t / \sin \varphi.$$

Из приведенных формул и рис. 2.11 видно, что при постоянной подаче S_o и глубине резания t с увеличением главного угла в плане φ толщина среза увеличивается, а ширина уменьшается.

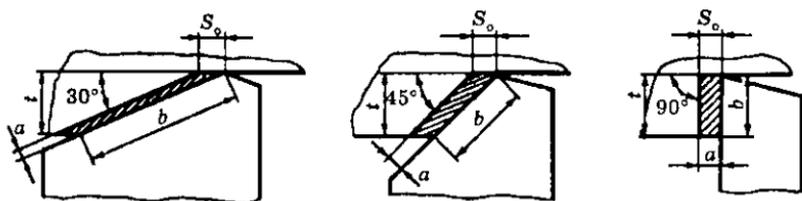


Рис. 2.11. Формы поперечного сечения срезаемого слоя при обработке резцами с различными углами φ

Зная подачу и глубину резания либо толщину и ширину срезаемого слоя, можно рассчитать площадь его поперечного сечения:

$$F = tS_o = ab.$$

Эта площадь определяет уровень сил резания и затрачиваемую на него мощность.

2.3. Физические явления при токарной обработке

Стружкообразование. Впервые классификацию стружки предложил в 1877 г. И.А. Тиме: стружка скалывания, или суставчатая (рис. 2.12, б), сливная (рис. 2.12, а), элементная (рис. 2.12, в) и надлома (рис. 2.12, г). *Стружка скалывания* состоит из отдельных элементов. Поверхность стружки, контактирующая с передней поверхностью резца, гладкая. Она образуется в резуль-

тате обработки сталей и других пластичных материалов при большой толщине срезаемого слоя, относительно низкой скорости резания и небольшом переднем угле γ . При уменьшении толщины среза, повышении скорости резания и увеличении переднего угла отдельные элементы стружки становятся менее отчетливыми и сходят без зазубрин на ее внешней стороне (*сливная стружка*). Если увеличить толщину среза, уменьшить скорость резания и передний угол γ , то отдельные элементы стружки будут менее связанными, т.е. образуется *элементная стружка*. Эти три вида стружки получаются при обработке пластичных металлов.

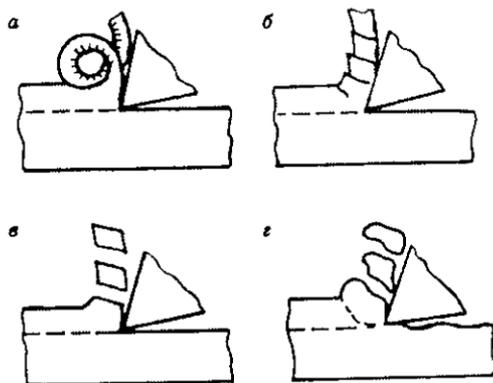


Рис. 2.12. Виды стружек

В случае обработки хрупких материалов при больших толщинах среза и больших передних углах происходит вырывание или откалывание крупных частиц металла неправильной формы. Получаемая при этом стружка называется *стружкой надлома*. Она образуется, например, при обработке чугуна, который плохо сопротивляется растяжению. При больших передних углах в срезаемом слое появляются напряжения отрыва, которые способствуют выламыванию кусков металла. Если увеличить скорость резания, то при обработке чугуна образуется элементная стружка, а при очень высоких скоростях чугун даст сливную стружку, хотя по сравнению со стальной прочностью ее низка.

Классификация И.А. Тиме не потеряла своего значения и в наше время, хотя и подверглась конкретизации. На рис. 2.13 приведены типовые формы стружки, возникающие при обработке стали, согласно классификации ISO.

Формы стружек							
1. Лента	2. Цилиндрическая спираль	3. Плоская спираль	4. Виточная открытая спираль	5. Виточная коническая спираль	6. Одно-витковые	7. Элементная	8. Игольчатая
1.1. Длинная	2.1. Длинная	3.1. Плоская	4.1. Длинная	5.1. Длинная	6.1. Связанные ветки		
1.2. Короткая	2.2. Короткая	3.2. Коническая	4.2. Короткая	5.2. Короткая	6.2. Отдельные ветки		
1.3. Путаная	2.3. Путаная		4.3. Путаная	5.3. Путаная			

Рис. 2.13. Формы стальной стружки

Характеристики стружки. При резании металлов толщина стружки a_c становится больше толщины среза a (рис. 2.14), а ее ширина больше ширины срезаемого слоя, т.е. $b_c > b$. Но так как объем стружки остается прежним, оказывается, что длина стружки l_c обычно становится короче пути l , пройденного инструментом.

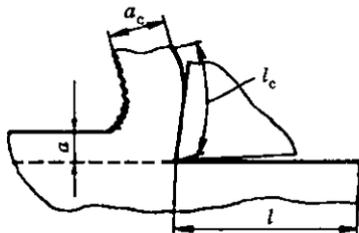


Рис. 2.14. Схема определения коэффициента укорочения сплошной стружки

Указанное изменение размеров срезаемого слоя называется *усадкой стружки* и характеризуется коэффициентами

$$K_l = \frac{l}{l_c}; \quad K_a = \frac{a_c}{a}; \quad K_b = \frac{b_c}{b},$$

где K_l , K_a , K_b — коэффициенты соответственно *укорочения*, *утолщения* и *уширения стружки*.

Эти коэффициенты, как правило, больше единицы. Они показывают, во сколько раз размеры стружки по длине, толщине и ширине меньше или больше соответствующих размеров срезаемого слоя. Так как объем стружки равен объему срезаемого слоя, то $lab = l_c a_c b_c$, поэтому $K_l = K_a K_b$. При черновой обработке уширением стружки можно пренебречь и считать, что $K_l = K_a$. При резании же с малыми сечениями среза K_b достаточно велик и достигает 1,5 и более. В этих случаях даже поперечное сечение стружки не соответствует сечению среза, а приобретает форму треугольника. Поэтому при исследовании чистовых процессов отдельно рассматривают K_l , K_a и K_b .

Рассмотрим факторы, влияющие на коэффициент укорочения стружки:

1) при увеличении переднего угла γ коэффициент укорочения стружки уменьшается;

2) применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) снижает трение и приводит к уменьшению усадки стружки;

3) чем больше толщина срезаемого слоя металла, тем меньше коэффициент укорочения стружки;

4) с увеличением скорости резания происходит немонокотное изменение укорочения стружки.

Зависимость $K_l = f(v)$ с различными углами γ при обработке стали 40 представлена на рис. 2.15. Характер изменения K_l при различных скоростях резания объясняется изменением размеров нароста (см. ниже). Минимальный коэффициент укорочения стружки соответствует наибольшему размеру нароста. Характерные точки, соответствующие максимальному значению коэффициента укорочения на кривых $K_l = f(v)$, или точки перегиба, тем больше сдвигаются в область низких скоростей резания, чем пластичнее обрабатываемый материал и меньше передний угол и толщина среза.

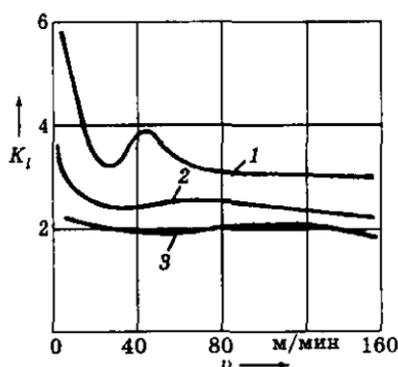


Рис. 2.15. Зависимость $K_l = f(v)$ с различными значениями угла γ при обработке стали 40:

1 — $\gamma = 0^\circ$; 2 — $\gamma = 15^\circ$; 3 — $\gamma = 30^\circ$

Вид кривых на рис. 2.15 объясняется тем, что при малых скоростях резания нарост не образуется и передний угол γ мал, т.е. коэффициент укорочения стружки K_l велик. С достижением скорости резания примерно 30 м/мин, когда нарост максимален, увеличивается действительный передний угол γ_d и, следовательно, снижается K_l . При скоростях резания 80...100 м/мин нарост исчезает, поэтому K_l становится максимальным. При дальнейшем

увеличении v (более 100 м/мин) в прирезцово́й зоне под действием высокой температуры граничный слой металла сильно размягчается и выполняет роль твердого смазочного вещества. В этих условиях коэффициент трения на передней поверхности инструмента сильно снижается, что сопровождается уменьшением коэффициента укорочения стружки.

Наростообразование. Резанию многих материалов при определенных условиях сопутствует явление, называемое наростообразованием. Под *наростом* понимают клиновидную относительно неподвижную область материала, расположенную на передней поверхности лезвия вдоль его режущей кромки (рис. 2.16). Нарост представляет собой слой сильно деформированного обрабатываемого материала с включениями оксидов и карбидов обрабатываемого и инструментального материалов, а также кобальта, входящего в состав твердого сплава. Строение нароста сложное: основная его часть — это тело, прочно соединенное с поверхностью инструмента, на которое нарастают последующие слои сходящей стружки; остальные части нароста расположены на нем, имеют иное происхождение и являются частью застойной зоны.



Рис. 2.16. Нарост на резце из быстрорежущей стали после обработки алюминия

Процесс образования нароста схематично можно представить следующим образом. При определенных температурах и высоких давлениях в зоне резания химически чистые (ювенильные) поверхности стружки и инструмента подвергаются адгезионному схватыванию: происходит прочное присоединение контактного слоя стружки к передней поверхности инструмента и образование

заторможенного слоя. Обтекание этого слоя стружкой способствует возникновению новых заторможенных слоев металла, которые наращиваются друг на друга, пока нарост не достигнет размеров, максимально возможных при данных условиях. Шероховатая поверхность каждого вновь образованного заторможенного слоя создает благоприятные условия для проникновения кислорода воздуха и его диффундирования в поверхностные слои металла. Оксидные пленки уменьшают трение между стружкой и поверхностью нароста, и каждый последующий заторможенный слой становится короче предыдущего, что приводит к образованию нароста клиновидной формы. При достижении определенной высоты прочность нароста оказывается недостаточной и он в результате действия сил резания разрушается.

Разрушенный нарост уносится частично стружкой, частично — поверхностью детали. Так как сходящая стружка скользит не по вершине реза, а по передней поверхности нароста, действительный передний угол лезвия $\gamma_d = \gamma_n$ увеличивается, что способствует облегчению процесса резания. Вследствие высокой твердости нарост, выполняя функции режущего лезвия, отчасти предохраняет переднюю и заднюю поверхности инструмента от истирания сходящей стружкой и обработанной поверхностью и уменьшает нагревание. Это приводит к уменьшению износа инструмента, т.е. к повышению периода его стойкости. Однако твердые частицы разрушенного нароста могут увеличить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей инструмента.

Наличие нароста увеличивает шероховатость обработанной поверхности, поскольку при разрушении нароста часть его уносится стружкой, а часть остается на обработанной поверхности детали.

Размеры нароста зависят от соотношения сил трения между образующейся стружкой и передней поверхностью лезвия инструмента и сил сцепления (сопротивления сдвигу) обрабатываемого и инструментального материалов; чем больше сила трения превышает силу сцепления, тем больше размеры нароста.

С помощью скоростной кино съемки установлено, что в большинстве случаев нарост — образование нестабильное. В каждой точке режущей кромки он возникает, увеличивается до максимальной высоты, затем частично или полностью разрушается, причем частота срывов может достигать 1000 или даже 2000 Гц.

Возникновение наростов характерно для обработки сталей, чугунов и алюминиевых сплавов; они встречаются при различных сочетаниях режимов резания, что обусловлено разными условиями трения на площадке контакта. Сила трения зависит от температуры в зоне образования стружки, т.е. температуры, которая определяется скоростью резания. Поэтому основной причиной изменения условий наростообразования с изменением скорости резания является температура резания. От нее в значительной степени зависит коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента.

При низких скоростях, когда температура в зоне резания невелика, коэффициент трения относительно небольшой, поэтому нароста еще нет или он очень мал (рис. 2.17). При повышении скорости резания растет температура, а следовательно, и коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента, который становится максимальным при достижении определенной температуры. В этот момент нарост наибольший. При дальнейшем повышении скорости и температуры резания наступает размягчение пограничных слоев металла, уменьшаются коэффициент трения и размеры нароста.

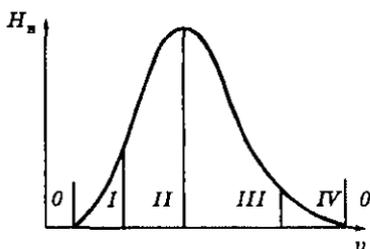


Рис. 2.17. Зависимость высоты нароста H_n от скорости резания: 0 — нарост отсутствует, I...IV — образуются наросты различных видов

Высота нароста зависит также от физико-механических свойств обрабатываемого металла (пластичности, прочности), толщины среза, величины переднего угла инструмента, условий охлаждения и смазывания в зоне резания и т.д. (рис. 2.18). Из рисунка видно, что чем менее пластичен материал ($HB_1 < HB_2$, рис. 2.18, а), меньше толщина срезаемого слоя ($a_1 > a_2 > a_3$, рис. 2.18, б), больше передний угол ($\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$, рис. 2.18, в), тем меньше высота нароста.

С применением СОЖ кривая зависимости $H_n = f(v)$ переходит из положения 1 в положение 2 (рис. 2.18, з). Таким образом, при данном обрабатываемом металле и постоянных условиях смазывания размеры и форма нароста определяются только температурой на передней поверхности лезвия инструмента. Скорость резания, толщина среза, передний угол влияют постольку, поскольку они влияют на температуру резания.

Закономерности изменения размеров нароста аналогичны закономерностям изменения высоты неровностей на обработанной поверхности в зависимости от скорости резания. Это объясняется тем, что при разрушении частицы нароста остаются на обработанной поверхности, резко ухудшая ее шероховатость (рис. 2.19).

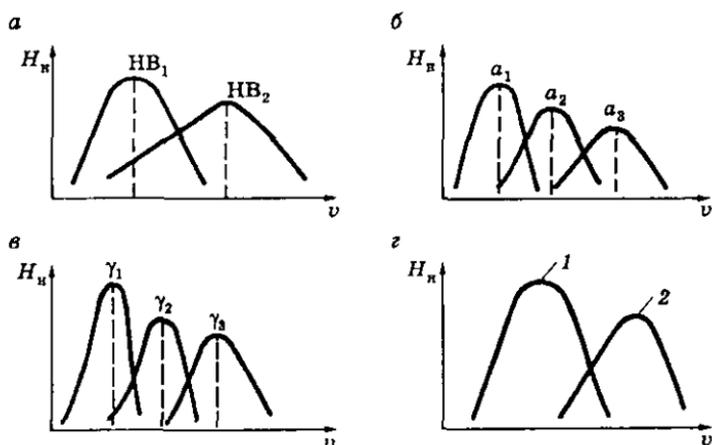


Рис. 2.18. Влияние условий резания на высоту нароста



Рис. 2.19. Влияние нароста на формирование микрорельефа обработанной поверхности

Все материалы, подвергаемые обработке резанием, можно разделить на две группы: не склонные и склонные к наростообразованию. К первой группе относятся медь и ее сплавы, большинство титановых сплавов, белый чугуны, закаленные стали, стали с большим содержанием хрома и никеля, ко второй — углеродистые и большинство легированных сталей, серый чугун, алюминиевые сплавы. При обработке этих материалов для снижения шероховатости обработанной поверхности необходимо:

- работать в зоне таких скоростей, при которых нарост не образуется, например в зоне очень низких скоростей резания; однако это влечет за собой снижение производительности обработки, поэтому выгоднее работать в зоне высоких скоростей, при которых образовавшийся нарост не задерживается на лезвии инструмента;
- снижать шероховатость передней поверхности режущего инструмента, применяя доводку при его заточке;
- изменять физико-химические свойства поверхностных слоев контактных площадок инструмента путем нанесения тонкопленочных покрытий или микролегирования;
- по возможности увеличивать передний угол лезвия (например, при $\gamma = 45^\circ$ нарост почти не образуется);
- применять СОЖ, уменьшающие трение на передней поверхности лезвия инструмента;
- уменьшать пластичность обрабатываемого материала путем применения специальной термической обработки или использовать стали с присадками.

2.4. Сопротивление резанию при токарной обработке

Общие сведения. Рассмотрим систему сил, возникающих при свободном резании* (рис. 2.20, а). Стружка давит на переднюю поверхность резца с силой $R_{\text{п}}$, которая является равнодействующей нормальной силы $N_{\text{п}}$ и силы трения стружки о переднюю поверхность $F_{\text{п}}$, т.е. $\vec{R}_{\text{п}} = \vec{N}_{\text{п}} + \vec{F}_{\text{п}}$. В то же время на заднюю поверхность резца вблизи режущей кромки действует нормальная сила упругого противодействия обрабатываемого материала $N_{\text{з}}$ и сила трения о заднюю поверхность инструмента $F_{\text{з}}$. Они дают результирующую силу $R_{\text{з}}$. Так как задний угол α мал, а при наличии площадки износа на некотором участке задней поверхности он равен нулю, в расчетной схеме принимаем направление сил $F_{\text{з}}$ и $N_{\text{з}}$, как показано на рис. 2.20, б, т.е. направление $F_{\text{з}}$ противоположно вектору скорости резания v . Для осуществления процесса резания или сохранения равновесия резца к нему

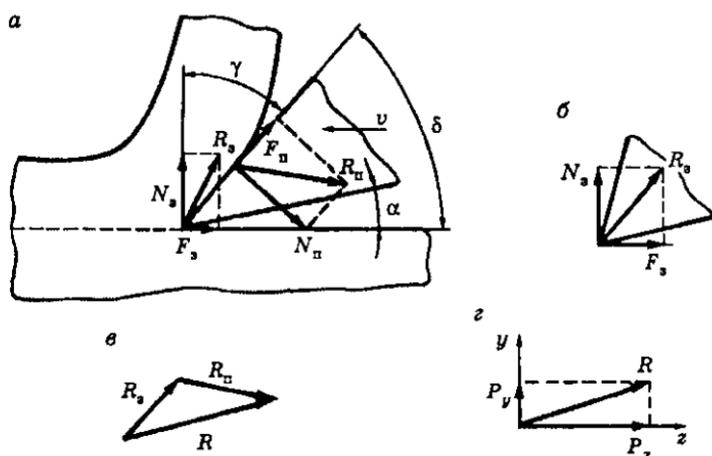


Рис. 2.20. Система сил, действующих при свободном резании

* При свободном резании в работе участвует только одна режущая кромка. На практике режущие инструменты работают в условиях несвободного резания, когда используются две и более режущие кромки.

извне должна быть приложена сила, равная по величине и противоположная по направлению силе $\vec{R} = \vec{R}_n + \vec{R}_z$ (рис. 2.20, е).

Разложим силу R , приложенную к резцу, на две составляющие: P_z в направлении главного движения резания (назовем ее *главной силой резания*) и P_y в направлении, совпадающем с осью резца (назовем ее *радиальной силой*). Спроецируем действующие силы на оси y и z (рис. 2.20, з):

$$P_z = N_n \cos \gamma + F_n \sin \gamma + F_z; \quad P_y = -N_n \sin \gamma + F_n \cos \gamma + N_z.$$

Наиболее часто силы резания определяют путем непосредственного измерения с помощью специальных приборов, называемых *динамометрами*.

Динамометры подразделяются на гидравлические, механические, электрические. В зависимости от того, сколько составляющих сил резания можно измерить динамометром, они бывают одно-, двух- или трехкомпонентными. Динамометры укомплектованы усилителями и регистрирующими устройствами; в настоящее время для регистрации сигнала широко используются компьютеры.

Примеры некоторых современных динамометров приведены на рис. 2.21.

Зависимость силы резания от ширины и толщины среза. Толщина a и ширина b среза не в одинаковой степени влияют на силу резания. Сила резания возрастает пропорционально увеличению b , но отстает от увеличения a .

На рис. 2.22 показаны различные условия резания при одинаковой площади среза. Найденная закономерность $P_z = f(a, b)$ имеет вид

$$P_z = C_{P_z} b^{x_{P_z}} a^{y_{P_z}}.$$

При обработке различных материалов (стали, чугуна, бронзы) в среднем $x_{P_z} = 1,0$, $y_{P_z} = 0,75$, $C_{P_z} = 2500 \dots 600$.

Отставание роста силы резания от увеличения толщины среза можно объяснить следующим: с увеличением толщины среза нагрузка на единицу длины режущего лезвия возрастает. В связи с этим увеличивается температура резания, что приводит к снижению сопротивления обрабатываемого материала пластическому деформированию. Пластические деформации и напряжения распределяются по толщине стружки неравномерно. Они значи-

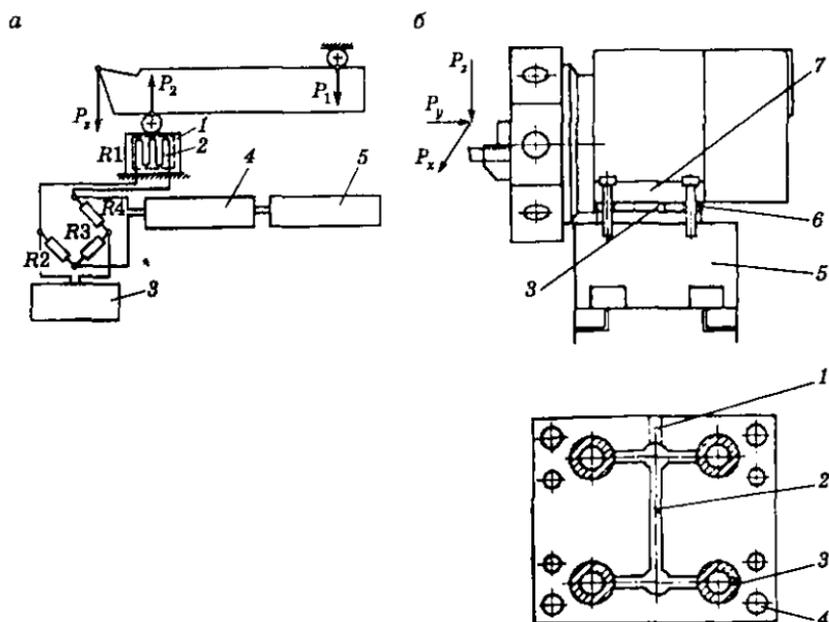


Рис. 2.21. Схемы динамометров: а — тензометрического (1 — измерительный элемент; 2 — тензометрический датчик; 3 — источник питания; 4 — усилитель; 5 — регистрирующий прибор); б — пьезоэлектрического (1 — соединительный кабель; 2 — каналы для кабеля; 3 — пьезоэлектрические элементы; 4 — отверстия под крепежные винты; 5 — поперечный суппорт; 6 — измерительная плита; 7 — основание револьверной головки)

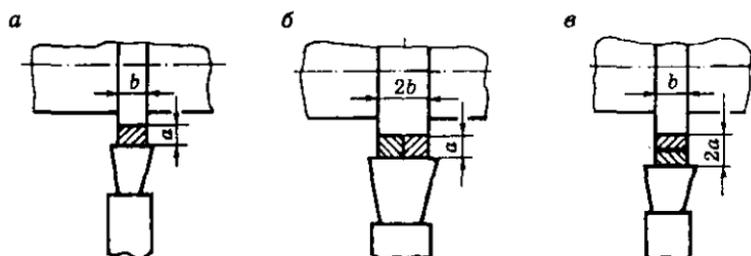


Рис. 2.22. Схемы для определения влияния параметров поперечного сечения среза на силу резания при исходном значении ширины и толщины среза (а), увеличенных значениях ширины (б) и толщины (в) среза

тельно больше в слоях, прилегающих к передней поверхности лезвия инструмента. Поэтому увеличение толщины среза приводит к относительному уменьшению слоя с максимальными деформациями. Кроме того, сила трения F_3 , действующая по задней поверхности лезвия как одна из слагаемых силы резания, с изменением толщины среза остается неизменной или изменяется очень мало. Таким образом, при сохранении площади поперечного сечения среза постоянной силы резания уменьшаются по мере уменьшения ширины и одновременно увеличения толщины среза.

Для весьма приблизительного определения силы резания P_2 исходя из площади поперечного сечения среза иногда используют удельную силу резания k_c , т.е. силу, приходящуюся на 1 мм^2 поперечного сечения среза:

$$P_2 = Fk_c = abk_c,$$

где F , a , b — площадь, толщина и ширина срезаемого слоя.

Уровень удельной силы резания зависит от толщины среза.

Зависимость сил резания от свойств обрабатываемого металла. При снятии стружки металл не только срезается, но и претерпевает сильную пластическую деформацию. Большое влияние на силы резания оказывают силы трения стружки и обрабатываемого материала соответственно о переднюю и заднюю поверхности лезвия инструмента. Однако необходимо учитывать, что в процессе обработки металл в зоне резания сильно разогревается. Следовательно, его свойства могут отличаться от свойств, которые характерны для него при статических испытаниях. Поэтому нет точной и однозначной зависимости между силой P_2 и временным сопротивлением σ_B обрабатываемого материала, а также его твердостью и другими механическими характеристиками. Установлено, что силы резания растут при увеличении σ_B , твердости, пластичности и вязкости обрабатываемого материала. На практике для сталей и чугунов при расчете силы P_2 в зависимости от σ_B и НВ используются следующие эмпирические формулы:

$$P_2 = C_M \sigma_B^q; \quad P_2 = C_M \text{НВ}^q,$$

где $q \approx 0,5$ (этот показатель степени для всех металлов всегда меньше единицы).

Влияние свойств инструментального материала на силу резания. Это влияние может быть вызвано только различием в силах трения (коэффициентах трения) между обрабатываемым и инструментальными материалами. Внутри групп быстрорежущих сталей и вольфрамокобальтовых твердых сплавов коэффициенты трения и укорочения стружки не различаются, а следовательно, сила P_z не изменяется.

Влияние скорости резания на силу резания. Рассмотрим, как изменяется сила резания в широком диапазоне скоростей на примере свободного резания стали 40X. Прежде всего необходимо отметить полную идентичность зависимостей $P_z = f(v)$ и $K_l = f(v)$. В тех областях скоростей резания, где уменьшается коэффициент укорочения стружки, снижается сила резания, и наоборот (рис. 2.23).

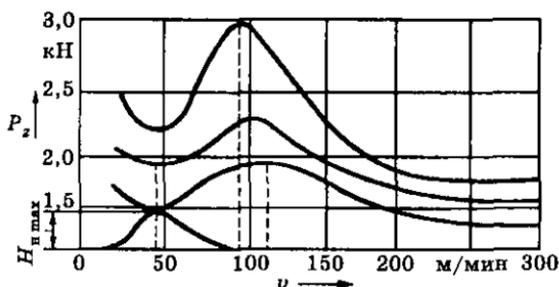


Рис. 2.23. Зависимость сил резания от скорости резания и переднего угла при обработке стали 40X с $a = 0,2$ мм, $b = 4$ мм

Сложный характер кривых $P_z = f(v)$ объясняется появлением нароста на передней поверхности лезвия инструмента. Минимальные значения силы на кривых $P_z = f(v)$ соответствуют максимально возможному наросту. При малой скорости резания, когда нарост не образуется, сила резания велика. В диапазоне скоростей, при которых наблюдается максимальное наростообразование, сила резания и укорочение стружки уменьшаются, так как с увеличением размеров нароста возрастает действительный передний угол инструмента. По мере дальнейшего повышения скорости резания высота нароста, а следовательно, и действительный передний угол уменьшаются. Одновременно с этим возрастают коэффициент укорочения стружки и силы резания.

Минимумы и максимумы кривых $P_z = f(v)$ тем рельефнее, чем меньше передний угол. Объясняется это тем, что больший нарост может образоваться (и образование его интенсивнее) при меньших передних углах инструмента. При обработке чугуна образуется меньший нарост, поэтому зависимость $P_z = f(v)$ имеет вид плавной кривой (рис. 2.24). Аналогично выглядят зависимости $P_z = f(v)$ для материалов, не склонных к наростообразованию — меди, жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, титановых сплавов.

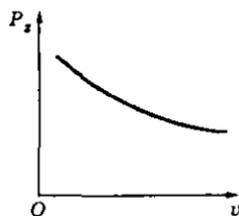


Рис. 2.24. Характер зависимости $P_z = f(v)$ при обработке чугуна

Влияние переднего и заднего углов на силу резания. При увеличении переднего угла γ облегчается врезание лезвий инструмента в деталь, улучшается сход стружки, уменьшается деформация обрабатываемого металла и снижается коэффициент укорочения стружки, а следовательно, уменьшается P_z .

С уменьшением угла α увеличивается контакт задней поверхности инструмента с обрабатываемой деталью, что приводит к росту сил трения и резания. Этому способствует то обстоятельство, что после прохождения режущего лезвия металл упруго восстанавливается, образуя дополнительную площадку контакта инструмент — деталь. Интенсивность влияния α на силы резания невелика. С увеличением заднего угла α от 2 до 10° P_z уменьшается на 6 %, а P_y — на 17 %. При дальнейшем увеличении угла α силы резания остаются почти постоянными.

Силы резания при точении. В условиях несвободного резания при точении равнодействующую силу сопротивления резанию R раскладывают на три составляющие (рис. 2.25): P_z — *главную силу резания*, которая действует в направлении скорости главного движения; P_y — *радиальную силу*, направленную по радиусу главного вращательного движения резания в вершине лезвия; P_x — *осевую силу*, действующую параллельно оси главного вращательного движения резания, т.е. силу подачи. По P_z производят расчеты прочности и жесткости резца, а также мощности, необходимой на осуществление резания.

При определении прогиба детали, прочности и жесткости отдельных деталей станка за основу принимают силу P_y , а прочность и жесткость механизма подачи станка рассчитывают по силе P_x .

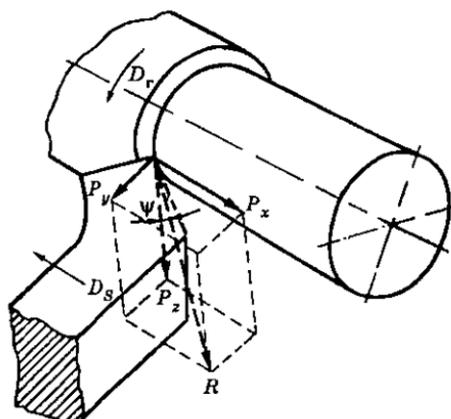


Рис. 2.25. Разложение силы резания при точении на три составляющие

Установлено, что при точении конструкционных сталей и чугунов резцом с геометрическими параметрами $\phi = 45^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ наблюдается следующее соотношение сил резания: $P_y = (0,4 \dots 0,5)P_z$, $P_x = (0,3 \dots 0,4)P_z$, а при точении жаропрочных сталей сила P_y может быть больше, чем P_z . Это же соотношение наблюдается и при точении практически всех материалов с малыми сечениями среза. С увеличением угла ϕ и уменьшением переднего угла γ отношение P_y/P_z уменьшается, а P_x/P_z увеличивается. Кроме того, относительные значения P_x и P_y возрастают с увеличением износа резца, особенно при затуплении его по задней поверхности. Для точного определения составляющих сил резания P_z , P_y и P_x используют эмпирические уравнения, полученные экспериментальным путем.

Экспериментальными исследованиями установлено, что для всех составляющих сил резания P_z , P_y и P_x влияние глубины резания и подачи может быть выражено общей зависимостью:

$$P = C_p t^{x_p} S^{y_p}.$$

Значения постоянных коэффициентов C_p и показателей степеней x_p и y_p зависят от свойств обрабатываемого металла, геометрических параметров режущей части резцов, условий смазывания, охлаждения зоны резания и т.д. В качестве примера приведем

эмпирические формулы для определения составляющих сил резания при точении стали проходными твердосплавными резацами:

$$P_z = C_{P_z} t S^{0,75} v^{-0,15}; \quad P_y = C_{P_y} t^{0,9} S^{0,6} v^{-0,3}; \quad P_x = C_{P_x} t S^{0,5} v^{-0,4}.$$

Чем выше твердость и прочность обрабатываемого материала, тем больше силы резания. Приведем их соотношения. Если HB' соответствует P' , а HB'' — P'' , то

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{HB'}{HB''} \right)^q; \quad P'' = P' \left(\frac{HB''}{HB'} \right)^q.$$

По этим формулам можно определить любую силу резания при обработке материала твердостью HB'' , если известна сила резания P' для материала твердостью HB' . Например, при обработке серого чугуна твердостью 190 HB сила $P'_z = 925$ Н. Требуется определить P''_z при обработке чугуна твердостью 241 HB . Тогда $P''_z = 925 (241/190)^{0,4} = 1018$ Н.

По мере увеличения угла φ при обработке чугуна сила P_z уменьшается, а при обработке стали сначала уменьшается, а затем (при $\varphi = 50^\circ$) возрастает (рис. 2.26). Такой характер зависимости $P_z = f(\varphi)$ объясняется тем, что увеличение угла φ приводит к уменьшению ширины b и увеличению толщины a среза, хотя при этом глубина резания и подача остаются неизменными.

Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 и угла наклона главной режущей кромки λ на силы резания незначительно, поэтому оно практически не учитывается.

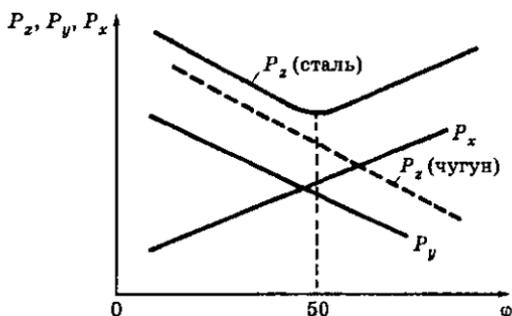


Рис. 2.26. Влияние главного угла в плане на силы резания P_z , P_y , P_x

Влияние угла φ на силы P_y и P_x легко объясняется изменением соотношения сил, действующих в горизонтальной плоскости. Как видно из рис. 2.27, с увеличением угла φ сила P_x возрастает, а P_y уменьшается. При $\varphi = 90^\circ$ сила P_y незначительна.

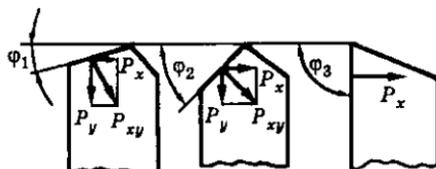


Рис. 2.27. Влияние главного угла в плане на составляющие силы резания P_x и P_y при $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$

Рассмотрев влияние различных факторов на силы резания, приведем обобщенные формулы для их расчета при точении:

$$P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}} K_{P_z};$$

$$P_y = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}} K_{P_y};$$

$$P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} v^{z_{P_x}} K_{P_x},$$

где C_p — постоянная, характеризующая определенные условия резания для конкретной марки обрабатываемого материала, принятого за основу (эталон) (например, для точения твердосплавными резцами стали с $\sigma_b = 650$ МПа (180 НВ) $C_{P_z} \approx 2700$; для фасонных резцов из быстрорежущей стали $C_{P_z} \approx 1900$; для отрезных резцов $C_{P_z} \approx 2200$; для серого чугуна твердостью 190 НВ $C_{P_z} \approx 900$); $K_p = K_m K_{НВ} K_\varphi K_\gamma K_{созж} K_h$ — поправочные коэффициенты, характеризующие влияние: K_m — группы обрабатываемого материала (сталь углеродистая, легированная и т.д.); $K_{НВ}$ (K_{σ_b}) — твердости (прочности) обрабатываемого материала; K_φ — главного угла в плане φ ; K_γ — переднего угла γ ; $K_{созж}$ — смазочно-охлаждающей жидкости; K_h — износа резца и т.д.

Значения постоянных C_p , поправочных коэффициентов K и показателей степени x , y и z приводятся в специальных справочниках по режимам резания. Там же помещены таблицы, позволяющие определять силы резания при различных значениях глубины резания и подачи.

Работа и мощность резания. В общем случае работа резания (в джоулях)

$$W = P_z L,$$

где P_z — сила резания, действующая в направлении скорости резания, Н; L — путь, проходимый режущим инструментом, м.

Зная силы резания, можно также определить мощность (в киловаттах), необходимую для резания. Ее называют *эффективной*, так как она не включает затраты мощности на преодоление сил трения в механизмах станка.

При точении

$$N_p = N_{P_z} + N_{P_y} + N_{P_x},$$

или

$$N_p = \frac{P_z v_z}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_y v_y}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_x v_x}{60 \cdot 10^3},$$

где P_z, P_y, P_x — силы резания, Н; v_z — скорость резания, м/мин ($v_z = v$); $v_y = 0$ — скорость перемещения резца в радиальном направлении, м/мин; v_x — скорость подачи, м/мин.

Так как v_x очень мала по сравнению со скоростью резания, третьим слагаемым при подсчете N_p можно пренебречь. Например, при точении с $v = 30$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об и $n = 800$ об/мин $v_x = 0,24$ м/мин. Тогда $N_p = P_z v / (60 \cdot 10^3)$.

Определив эффективную мощность N_p , можно найти потребляемую мощность электродвигателя станка:

$$N_{дв} = \frac{P_z v}{60 \cdot 10^3 \eta_{ст}},$$

где $\eta_{ст}$ — КПД станка.

При кратковременных перегрузках станок может развивать значительно большую мощность. Коэффициент допустимой кратковременной перегрузки составляет 1,2...1,3, а при времени перегрузки не свыше 1 мин — 1,5.

2.5. Тепловые явления при токарной обработке

Баланс теплоты в зоне резания. В процессе резания важную роль играют тепловые явления. Именно они определяют температуру в зоне резания, которая оказывает прямое воздействие на характер образования стружки, нарост, усадку стружки, силы резания и микроструктуру поверхностного слоя. Еще более существенно воздействует температура резания на интенсивность затупления инструмента и период его стойкости.

Выделение теплоты при снятии стружки объясняется тем, что в теплоту преобразуется механическая работа, затраченная на срезание стружки:

$$W = W_{\text{деф}} + W_{\text{т.п.п}} + W_{\text{т.з.п}},$$

где $W_{\text{деф}}$, $W_{\text{т.п.п}}$, $W_{\text{т.з.п}}$ — работа, затрачиваемая соответственно на упругую и пластическую деформации срезаемого слоя, на преодоление сил трения по передней и задней поверхностям.

В теплоту переходит практически вся работа резания (более 99,5 %). Пути распространения тепловых потоков без учета искусственного охлаждения инструмента и детали приведены на рис. 2.28, а. Как видно, при резании наблюдается сложное переплетение тепловых потоков, поскольку теплота от каждого из трех основных источников распределяется всем телам, участвующим в резании. Эту схему можно значительно упростить (рис. 2.28, б), введя понятие итоговых тепловых потоков, проходящих через контактные площадки.

Зная количество теплоты, выделяемой в процессе резания и распространяемой между стружкой, обрабатываемой деталью, инструментом и средой, можно записать уравнение баланса тепловой и механической энергии при резании:

$$W_{\text{деф}} + W_{\text{т.п.п}} + W_{\text{т.з.п}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{о.с}},$$

где $Q_{\text{с}}$, $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{д}}$, $Q_{\text{о.с}}$ — количество теплоты, переходящей соответственно в стружку, инструмент, деталь и окружающую среду.

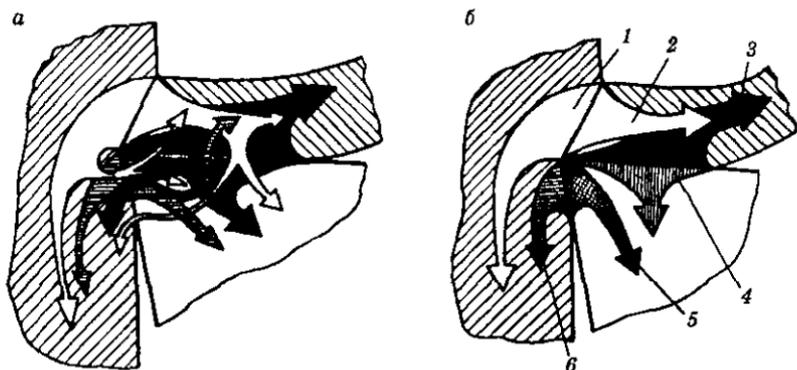


Рис. 2.28. Схемы движения тепловых потоков:

1 — доля теплоты деформации, уходящая в деталь ($Q_{\text{деф. д}}$); 2 — доля теплоты деформации, уходящая в стружку ($Q_{\text{деф. с}}$); 3 — количество теплоты, возникающей в результате трения между стружкой и передней поверхностью инструмента ($Q_{\text{т. л}}$); 4 — итоговый поток теплоты, возникающей в результате теплообмена на площадке контакта надрезочной стороны стружки с передней поверхностью инструмента ($Q_{\text{п}}$); 5 — итоговый поток теплоты, возникающей в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента ($Q_{\text{з}}$); 6 — количество теплоты, возникающей в результате трения между деталью и задней поверхностью инструмента ($Q_{\text{т. з}}$)

Эксперименты показывают, что при резании с небольшой скоростью (до 30...40 м/мин) относительное количество теплоты составляет: $Q_{\text{с}}$ — 60...70 %, $Q_{\text{и}}$ — 3, $Q_{\text{д}}$ — 30...40, $Q_{\text{о. с}}$ — 1...2 %. Установлено, что чем ниже теплопроводность обрабатываемого материала, тем большее количество теплоты уходит в инструмент. По мере увеличения скорости резания значительно возрастает относительное количество теплоты, уходящей в стружку. Из опытов известно, что при скорости $v = 400...500$ м/мин теплота распределяется так: $Q_{\text{с}} \approx 97...98$ %, $Q_{\text{и}} \approx 3$ %.

Использование технологических сред позволяет значительно повысить $Q_{\text{о. с}}$ в общем тепловом балансе. В зависимости от условий подвода среды уменьшаются $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{с}}$ и $Q_{\text{д}}$.

Зная величину и направление итоговых тепловых потоков, можно расчетным путем установить законы распределения температур на контактных площадках (рис. 2.29). Из рисунка видно, что различные места стружки нагреты неравномерно. Наибольшее количество теплоты концентрируется в тонких слоях стружки,

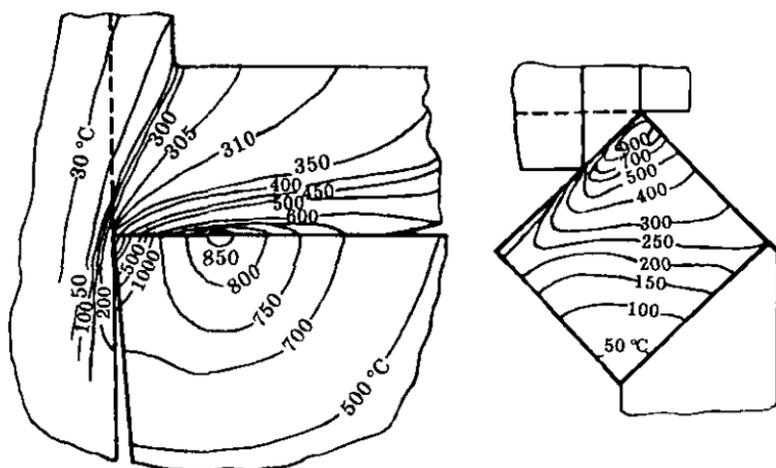


Рис. 2.29. Температурные поля в стружке, детали и резце при точении стали ШХ15 резцом из твердого сплава Т14К8 ($v = 80$ м/мин, $S = 0,5$ мм/об, $t = 4,1$ мм)

прилегающих к передней поверхности. Здесь температура намного превышает температуру в зоне сдвига. По мере удаления от передней поверхности резца температура слоев стружки резко падает. В прирезцовом слое максимальная температура наблюдается в середине длины площадки контакта. От этой области температура убывает по направлению как к режущей кромке, так и к точке отрыва стружки от передней поверхности. Температура обрабатываемого материала, лежащего ниже поверхности резания, значительно меньше температур в стружке и на площади сдвига.

Режущее лезвие также нагревается неравномерно. Сильнее всего разогрет участок передней поверхности, расположенный в середине длины площадки контакта, тогда как у вершины уровень температур меньше. По мере удаления от передней поверхности температура в режущем лезвии изменяется гораздо менее значительно, чем температура стружки.

Оценивая влияние различных факторов на температуру резания, следует учитывать изменение условий подвода и отвода теплоты в этой зоне. Другими словами, можно сказать, что на температуру резания оказывают влияние те же факторы, что и на изменение теплового баланса.

Влияние скорости резания. С увеличением скорости резания возрастает количество теплоты, выделяющейся в зоне резания, а также температура нагрева детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры в зоне резания отстает от роста скорости резания. Это отставание особенно усиливается в зоне высоких скоростей, что видно на отдельных участках кривой, представленной на рис. 2.30. Кривую можно разбить на отдельные участки и получить простые зависимости вида

$$\Theta = C_{\Theta_v} v^\alpha,$$

где C_{Θ_v} — коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех остальных факторов, кроме скорости резания; α — показатель степени, указывающий интенсивность влияния скорости резания на повышение температуры резания Θ . Обычно $\alpha < 1$ (например, $\alpha = 0,5$ при обработке стали со скоростями резания $v = 10 \dots 20$ м/мин; $\alpha = 0,4$ при $v = 25 \dots 45$ м/мин; $\alpha = 0,2$ при $v = 45 \dots 180$ м/мин).

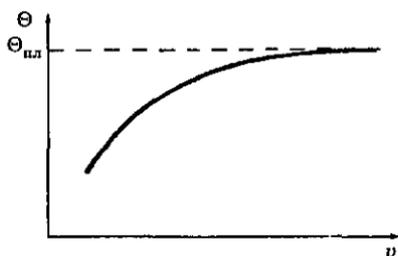


Рис. 2.30. Зависимость температуры от скорости резания

Температура в зоне резания при тяжелых условиях работы может достигать $1000 \dots 1100$ °С. С увеличением v растет мощность резания $N = P_2 v$ и, следовательно, количество выделяемой теплоты. Но непосредственно в резец переходит очень небольшое ее количество, а основное — уносится стружкой. Поэтому, хотя с увеличением скорости резания температура резания повышается, этот рост все время замедляется. Кроме того, допущение о том, что $N = P_2 v$ изменяется пропорционально v , не совсем правильное, так как по мере увеличения v сила резания P_2 уменьшается. Унос

теплоты стружкой тоже растет с повышением скорости резания, поэтому нет прямой зависимости изменения температуры резания Θ от v .

Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала. На силы резания, а следовательно, на работу резания и количество выделяющейся теплоты, а также на условия теплоотвода оказывают влияние физико-механические свойства обрабатываемого материала. На температуру резания Θ они влияют так же, как и на силу резания P_z , т.е. имеется тенденция к увеличению Θ с повышением прочности, твердости и пластичности обрабатываемого материала. Большое воздействие на температуру резания оказывают теплопроводность обрабатываемого материала и характер его микроструктуры. Чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем ниже Θ , так как отвод теплоты от места ее выделения в стружку и деталь более интенсивен.

В настоящее время довольно широко применяются жаропрочные, нержавеющие и другие труднообрабатываемые стали с высоким содержанием таких легирующих элементов, как хром, никель, вольфрам, марганец и др. Эти стали имеют аустенитную структуру и отличаются низкой теплопроводностью. При обработке таких сталей температура резания значительно выше, чем при обработке обычных сталей перлитного класса. Еще меньше теплопроводность титановых сплавов, поэтому температура Θ при их обработке очень высокая.

Влияние элементов сечения среза. С увеличением ширины среза b прямо пропорционально растут сила, работа резания и количество выделяющейся теплоты. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущей кромки (рис. 2.31),

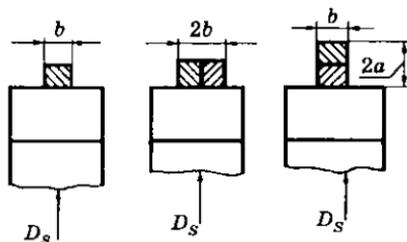


Рис. 2.31. Длина активной части режущей кромки резца при различной ширине среза

а соответственно и отвод теплоты. Поэтому с увеличением b температура резания изменяется незначительно. Экспериментально установлена зависимость

$$\Theta = C_{\Theta_b} b^\beta,$$

где C_{Θ_b} — коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех остальных факторов, кроме ширины среза; β — показатель степени, учитывающий влияние ширины среза на повышение Θ (обычно $\beta \approx 0,1$).

В зависимости от толщины срезаемого слоя a сила P_z увеличивается примерно в степени 0,75. Так же увеличиваются работа резания и количество выделяемой теплоты. Одновременно растет, хотя и в меньшей степени, площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это несколько улучшает условия отвода теплоты, поэтому увеличение температуры отстает от роста толщины среза:

$$\Theta = C_{\Theta_a} a^\gamma,$$

где $\gamma = 0,2 \dots 0,3$.

Влияние геометрических параметров инструмента. С изменением переднего угла инструмента изменяются условия подвода и отвода теплоты, а следовательно, и температура резания. С увеличением угла γ уменьшается сила, а значит, работа резания и количество выделившейся теплоты. Однако при этом ухудшаются условия ее отвода, так как уменьшается угол заострения β , т.е. массивность головки резца. Поэтому существует некоторый оптимальный угол γ , при котором уменьшаются силы резания и количество выделившейся теплоты. С увеличением γ выше оптимального уменьшается массивность головки резца, ухудшаются условия теплоотвода, растет температура резания (рис. 2.32). Аналогично влияет на температуру задний угол.

С уменьшением главного угла в плане ϕ увеличивается угол при вершине ϵ , что приводит к возрастанию массы головки резца и улучшению теплоотвода, а следовательно, к уменьшению Θ , и наоборот (рис. 2.33).

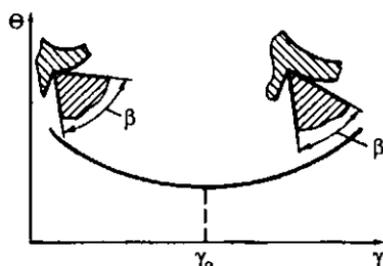


Рис. 2.32. Зависимость температуры резания от переднего угла инструмента

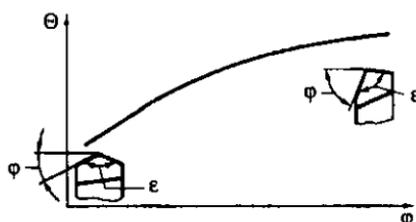


Рис. 2.33. Зависимость температуры резания от главного угла инструмента в плане

2.6. Износ и стойкость резцов

Внешняя картина износа резцов. Первые признаки изнашивания режущих лезвий обнаруживаются уже в начале резания. При осмотре режущих лезвий с помощью микроскопа заметны микровыкрашивания на режущих кромках и в местах их сопряжения, возрастание радиусов округления лезвий, появление вдоль главной режущей кромки узкой светлой полоски, которая и является признаком начала изнашивания. В процессе работы инструмента увеличиваются размеры площадок износа. В зависимости от условий резания эти площадки могут образовываться на разных участках лезвий инструмента.

Изнашивание *задней поверхности* инструмента h_2 наблюдается при обработке сталей с малой толщиной среза (не более 0,10 мм) и низкими скоростями резания, а также при обработке чугуна. Объясняется это следующим: 1) при малых толщинах среза радиус округления режущего лезвия соизмерим с толщиной среза; 2) при тонкой стружке возрастает относительная упругая деформация поверхностного слоя; 3) путь трения по задней поверхности больше, чем по передней, из-за укорочения стружки. Преимущественное затупление по задней поверхности наблюдается при работе протяжками, метчиками, зуборезными головками, долбьяками, фасонными резцами, цилиндрическими фрезами. Перечисленные инструменты работают на низких скоростях резания и при малых толщинах среза.

При работе резцов с высокими скоростями резания и малой толщиной среза часто наблюдается износ вспомогательной задней поверхности инструмента в виде канавок с шагом, равным подаче. Он возникает в результате контактного взаимодействия обработанной и вспомогательной задней поверхностей и может существенно превышать износ по главной задней поверхности.

Интенсивное изнашивание *передней поверхности* инструмента происходит при большом давлении на контактной площадке, когда повышается температура резания. Такие условия наблюдаются при обработке стали без охлаждения с высокими скоростями резания и большими толщинами среза ($a > 1,0$ мм). Износ передней поверхности лезвия проявляется в виде лунки, размеры которой определяются размерами площадки контакта. В процессе резания ширина B и глубина h_d лунки постепенно увеличиваются. При этом ширина лунки растет быстрее в сторону, противоположную режущей кромке. Кривизна лунки постепенно уменьшается, а площадка износа увеличивается, и когда ширина перемычки f достигает нуля, наступает полный, или *катастрофический*, износ инструмента.

Наиболее характерные виды износа передней и задней поверхностей резцов приведены на рис. 2.34. Чаще всего наблюдается одновременное изнашивание задней и передней поверхностей инструмента; при этом происходит округление режущего лезвия инструмента.

В производственных условиях основной мерой износа для большинства инструментов является ширина изношенной пло-

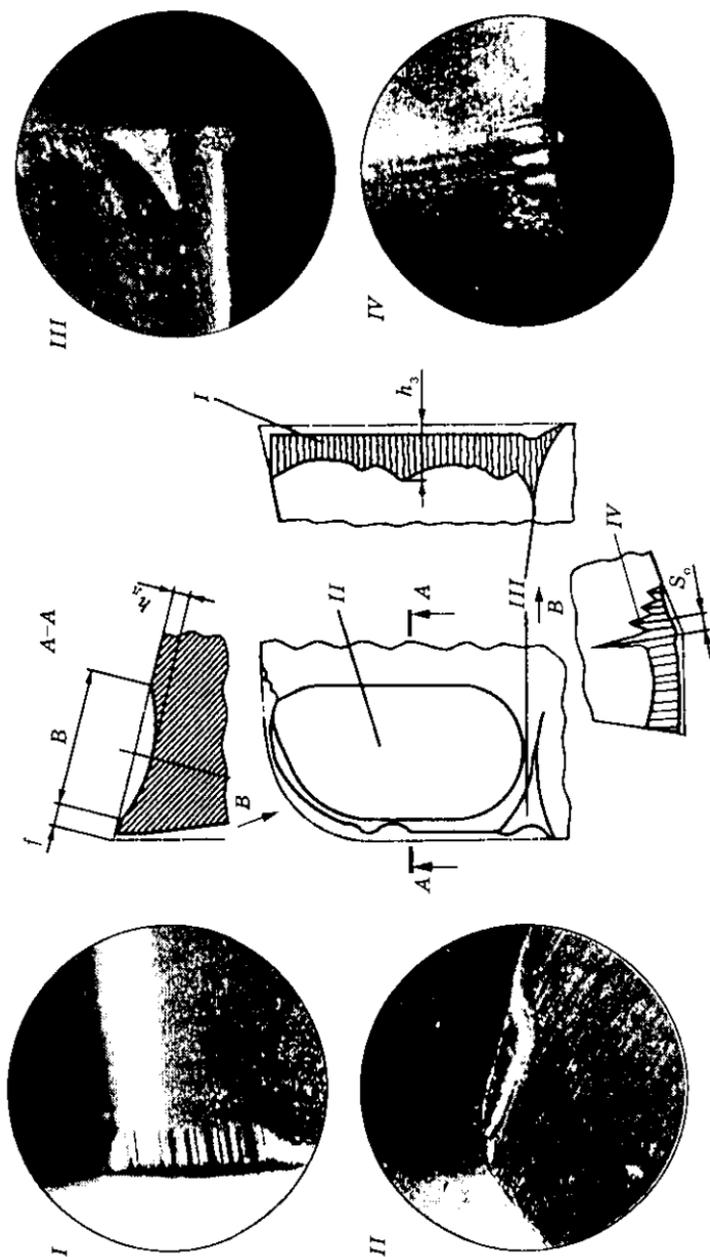


Рис. 2.34. Характерные виды износа резцов

щадки на задней поверхности лезвия h_3 , а для инструментов с преобладающим износом передней поверхности — глубина h_1 и ширина B лунки.

Графическое изображение закономерности нарастания износа за время работы инструмента называется *кривой износа*. В общем случае на кривой износа (рис. 2.35) можно выделить три участка: 1 — период приработки, или начального износа, продолжительностью несколько минут (на этом участке наблюдается ускоренное изнашивание, являющееся следствием истирания выступающих участков исходных неровностей на заточенной поверхности инструмента); 2 — период нормального изнашивания, когда шероховатость рабочих поверхностей инструмента становится небольшой; при этом износ постепенно увеличивается приблизительно пропорционально времени работы инструмента (это наиболее продолжительный период); 3 — период быстрого (катастрофического) изнашивания, сопровождающегося выкрашиванием и даже поломками инструмента (этот вид износа недопустим при нормальной работе инструмента).

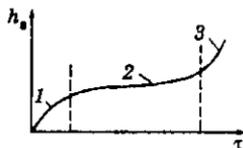


Рис. 2.35. Характер изменения износа резца за время его работы

Критерии затупления. Критерий отказа инструмента, характеризующийся максимально допустимым значением износа режущего лезвия, после достижения которого наступает его отказ, называется *критерием затупления*.

Принятые критерии зависят от характера обработки и обрабатываемого материала. Например, о возрастании износа инструмента можно судить по быстрому росту сил резания. Такой критерий затупления называется *силовым*.

При достижении резцом условий катастрофического износа на поверхности детали появляется блестящая (при обработке сталей) или темная (при обработке чугунов) полоска. В этом случае говорят о критерии *блестящей полоски*.

Если к выполняемой операции не предъявляются высокие требования по точности и шероховатости обработанной поверхности, целесообразно доводить инструмент до такой степени износа, при которой полный период его стойкости наибольший. Такой критерий затупления называется *оптимальным*.

Полный период стойкости инструмента

$$\Sigma T = T(k - 1),$$

где T — период стойкости инструмента, соответствующий данному износу; k — количество переточек инструмента, допустимых при данном износе.

Чем больше допустимый износ, тем больше длительность работы инструмента до затупления, но тем больший слой металла необходимо срезать с инструмента при его переточке, следовательно, тем меньше возможное количество переточек. Поэтому полный период стойкости с увеличением допустимого износа сначала увеличивается, а затем, когда количество допустимых переточек становится слишком малым, уменьшается.

Износ, соответствующий максимальному полному периоду стойкости инструмента, является оптимальным, т.е. наивыгоднейшим. Откладывая его значение на кривой износа, можно найти оптимальный период стойкости при данной скорости резания (рис. 2.36). Эта точка на кривой соответствует моменту перехода периода нормального износа в катастрофический.

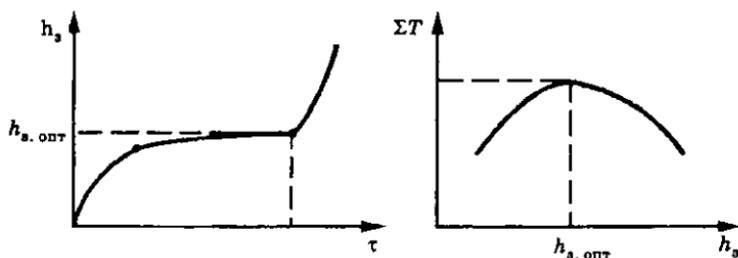


Рис. 2.36. К определению оптимального износа

Размеры площадки износа инструмента могут ограничиваться требованиями обеспечения необходимого качества или точности обработанной поверхности. Такие критерии называются *технологическими*. В зависимости от обрабатываемого материала наряду с ограничениями шероховатости и точности обработки учитываются и другие факторы. Например, при сверлении пластмасс устанавливают дополнительный технологический критерий затупления сверл по образованию сколов и отслоений

материала на входе и выходе сверла из отверстия, появлению прижогов на поверхностях инструмента и обрабатываемой детали, обильному выделению газов.

Стойкость резцов. Продолжительность резания новым или переточенным режущим инструментом до его отказа, т.е. до достижения предельно допустимого износа, называется *периодом стойкости* T . Иногда для выражения технологических возможностей период стойкости инструмента дается в метрах пути резания (T_L) и в количестве деталей, обработанных между двумя переточками.

Чем выше интенсивность изнашивания инструмента, тем меньше период его стойкости. Последний служит количественным выражением интенсивности изнашивания инструмента и сильно изменяется в зависимости от условий резания — режимов резания, геометрических параметров режущей части инструмента, применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и т.д. Одним из основных факторов, определяющих период стойкости инструментов, является скорость резания. Это обусловлено в первую очередь тем, что в зависимости от скорости изменяется температура в зоне резания.

Чтобы получить график зависимости $T = f(v)$ для определенного инструмента, его изнашивают до полного затупления. При этом все условия резания, кроме скорости резания v , сохраняются постоянными. Затем строят графики зависимости износа от времени резания $h_s = f(\tau)$ (рис. 2.37), по которым находят соответствующие значения T при предельном износе $h_s = \Delta$, и строят кривые $T = f(v)$ или $v = f(T)$.

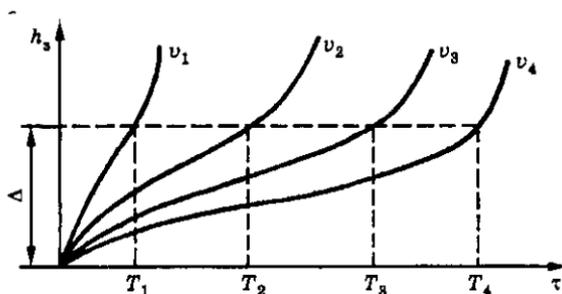


Рис. 2.37. Графики зависимости $h_s = f(\tau)$

Исходя из анализа кривых износа инструментов получаем зависимость ширины площадки износа от продолжительности работы инструмента τ , скорости резания v , толщины a и ширины b срезаемого слоя:

$$h_3 = C\tau^\alpha v^\beta a^\gamma b^\epsilon.$$

Принимаем $a = \text{const}$ и $b = \text{const}$, критерий затупления $h_3 = \Delta = \text{const}$; тогда

$$\tau^\alpha = \frac{\Delta}{C'} \cdot \frac{1}{v^\beta}.$$

Но $\tau = T$, поэтому

$$T = \left(\frac{\Delta}{C'}\right)^{1/\alpha} \cdot \frac{1}{v^{\beta/\alpha}}.$$

Введя обозначения $(\Delta/C')^{1/\alpha} = C_T$, $\beta/\alpha = \mu$, получим:

$$T = C_T/v^\mu \text{ или } v = C_v/T^m,$$

где C_T , C_v — постоянные величины для данных условий резания, зависящие от материала инструмента, обрабатываемого материала, площади сечения среза, геометрии инструмента, условий охлаждения и т.д.; $\mu = 1/m$, или $m = 1/\mu$; m — *показатель относительной стойкости*, характеризующий интенсивность изменения периода стойкости инструмента в зависимости от изменения скорости резания.

Значение m непостоянно. На него влияют как свойства инструментального материала, так и все другие условия процесса резания, и особенно скорость резания: чем тяжелее условия работы инструмента в отношении высоких температур и сильного истирания и чем хуже инструмент сопротивляется изнашиванию, тем меньше показатель относительной стойкости. Приведем ориентировочные значения для некоторых случаев обработки: точение стали быстрорежущими резцами без охлаждения — $m = 0,10 \dots 0,12$; то же с охлаждением — $m = 0,2$; точение чугуна быстрорежущими резцами — $m = 0,08 \dots 0,10$; точение стали и чугуна твердосплавными резцами — $m = 0,2 \dots 0,3$.

В логарифмических координатах приведенная выше зависимость изображается в виде прямой линии $\lg T = \lg C_T - \mu \lg v$ (μ — тангенс угла наклона линии к оси $\lg v$).

Полученная зависимость $T = f(v)$ имеет важное значение, так как позволяет при изменении v определять период стойкости T . Кроме того, эта зависимость дает возможность решать ряд практических задач, возникающих на производстве. Зная скорость резания v_1 и период стойкости инструмента T_1 , путем расчета можно определить T_2 или v_2 при сохранении прочих условий резания без изменений:

$$T = C_T / v^\mu; \quad v^\mu T = C_T = \text{const},$$

следовательно, $v_1^\mu T_1 = v_2^\mu T_2$; после преобразования имеем:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\mu \quad \text{или} \quad v_2 = v_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/\mu}.$$

При решении практических задач необходимо учитывать, что даже небольшое увеличение скорости резания может вызвать резкое падение стойкости, и наоборот.

2.7. Скорость резания, допускаемая режущими свойствами резца

Скорость резания, допускаемая инструментом, зависит от его режущих свойств и является скоростью при определенном (заранее обусловленном) периоде стойкости инструмента. Такая скорость при постоянной стойкости обозначается v_T . Тогда пишут: v_{20} , v_{60} , v_{90} . Это означает, что скорость резания соответствует периоду стойкости $T = 20, 60, 90$ мин. Зная v_T , можно определить частоту вращения детали:

$$n = \frac{1000 v_T}{\pi D}.$$

Очевидно, что на период стойкости инструмента влияет не только скорость резания, но и другие факторы. Характер влияния a и b на v_T аналогичен их влиянию на температуру резания

и обусловлен теми же причинами, т.е. при увеличении толщины среза возрастает количество выделяемой теплоты, а длина активной части режущей кромки остается неизменной. При увеличении ширины среза наряду с возрастанием количества выделяемой теплоты активная часть режущей кромки становится длиннее и отвод теплоты интенсифицируется. В последнем случае будет меньше тепловая нагрузка на единицу длины режущей кромки и, следовательно, ниже Θ . Поэтому увеличение ширины среза в меньшей степени сказывается на повышении интенсивности изнашивания инструмента и снижении периода его стойкости, чем увеличение толщины среза.

Суммируя сказанное, можно записать общий вид зависимостей $v = f(T, S, t)$ для расчета скорости резания при точении:

$$v = \frac{C_v}{T^m S^{y_v} t^{x_v}} K_v.$$

В приведенной формуле коэффициент K_v учитывает измененные условия работы режущего инструмента. Значения величин C_v , x_v , y_v и других для каждого конкретного случая обработки различны, но определять их все с практической точки зрения нецелесообразно. Обычно в справочно-нормативной литературе приводятся только их наиболее распространенные значения, а для остальных случаев — поправочные коэффициенты, учитывающие измененные свойства инструментального материала ($K_{и}$), обрабатываемого материала ($K_{м}$), геометрические параметры инструмента (K_r , K_{ϕ} , ...), условия охлаждения ($K_{охл}$): $K_v = K_{м} K_{и} K_r K_{\phi} \dots$

Такие поправочные коэффициенты позволяют учесть сложное влияние, которое оказывают свойства обрабатываемого и инструментального материалов, углы заточки резца, условия охлаждения и многие другие параметры обработки на условия стружкообразования, уровень сил и температур резания, а значит — на период стойкости инструмента.

2.8. Смазочно-охлаждающие технологические среды

Применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при обработке резанием уменьшает силы и температуру в зоне резания, повышает период стойкости режущего инструмента, улучшает качество обработанной поверхности детали, а следовательно, и ее эксплуатационные характеристики. Применение технологических сред — одно из основных направлений интенсификации процесса механической обработки различных материалов.

Разновидности технологических сред и области их применения. Номенклатура технологических сред, используемых при обработке металлов резанием, чрезвычайно разнообразна. Среди них жидкие, твердые и газообразные вещества. К *жидким технологическим средам* относятся: водные растворы органических и неорганических веществ; растворы эмульсолов, образующих в воде грубые дисперсии или микроэмульсии; масла различной вязкости; быстроиспаряющиеся жидкости; расплавы металлов, солей и других веществ.

В состав жидких технологических сред входят присадки на основе животных или растительных жиров, органических кислот, содержащие соединения серы, фосфора, галогенов и других активных элементов, а также растворимые полимеры, комплексные металлоорганические соединения и другие вещества. Использование присадок оказывает многостороннее воздействие на физические процессы, происходящие в зоне резания. Жидкие среды используются при всех видах лезвийной и абразивной обработки, снижая интенсивность изнашивания, уровень сил резания, повышая качество обработанной поверхности. Рекомендации по их применению с учетом обрабатываемого материала, вида обработки и процентного содержания концентрата в воде приведены в справочной литературе.

Расплавы легкоплавких металлов являются эффективными технологическими средами, позволяющими обрабатывать высокопрочные материалы, не поддающиеся резанию с другими СОТС.

Расплавы способствуют уменьшению сил резания и интенсивности изнашивания инструментов. Наряду с высокими смазочными и охлаждающими свойствами особенностью металлических расплавов является их способность снижать прочность обрабатываемого материала. Например, при сверлении труднообрабатываемых материалов жидкий поверхностно-активный металл влияет на характер стружкообразования, изменяя пластичность срезаемого слоя. Стружка при этом резко измельчается и приобретает форму мелких иголочек шириной около 0,1 мм, взвешенных в жидком металле.

В качестве жидких расплавов используют сплавы Вуда, эвтектические сплавы типа олово – цинк, олово – свинец, висмут – кадмий и др. Общий недостаток использования расплавов — необходимость подогрева среды и обеспечения минимально допустимой подачи расплава в зону резания. Поэтому иногда вместо жидкометаллических сред применяют суспензии порошков металлов. В качестве среды для приготовления суспензии можно использовать масла или водоземulsionные СОТС.

Промежуточное положение между твердыми смазочными материалами и маслами занимают *пластичные смазочные вещества*, или *пасты*. Они состоят из двух компонентов: жидкой основы (масел различных видов) и загустителя. Кроме того, в состав паст входят различные присадки и наполнители (например, графит, дисульфид молибдена, порошкообразные металлы), которые повышают смазочные и другие свойства паст. Характерные для них условия работы — малые скорости резания, при которых достаточно периодического смазывания инструмента. Это касается, в частности, нарезания резьб, протягивания, развертывания, полирования и т.д. Пасты применяют на оборудовании, где отсутствует система охлаждения, а также в тех случаях, когда по технологическим или санитарно-гигиеническим условиям невозможно применение жидких сред.

В этих же случаях используют *твердые смазочные материалы*. Наибольший эффект достигается при обмазке ими лезвий сложного фасонного режущего инструмента, например протяжек, червячных фрез, резцовых головок, метчиков. Нанесенная пленка должна иметь достаточную механическую прочность, высокую адгезию, эластичность и образовывать на поверхности металла непрерывный слой. Для введения твердых смазочных

материалов в зону обработки используют специальные бrikеты или карандаши, распыление, окунание в суспензии.

Среди твердых смазочных материалов широкое распространение получил дисульфид молибдена, но можно использовать и другие вещества, например графит, йодиды, сульфиды и селениды металлов, нитрид бора. Смазочное действие в этом случае обеспечивается за счет своеобразной структуры этих материалов. Их кристаллическая решетка состоит из множества параллельных слоев. Связь между атомами внутри слоя значительно сильнее, чем между атомами, расположенными в соседних слоях, в результате слои легко скользят относительно друг друга.

Использование твердых смазочных материалов иногда лимитируется химическими реакциями, происходящими при высоких температурах. Например, при температурах выше 400 °С дисульфид молибдена MoS_2 превращается в MoS_3 , имеющий не смазывающие, а абразивные свойства.

Газообразные технологические среды применяются в тех случаях, когда по условиям технологического процесса не допускаются к применению жидкие среды. При высоких скоростях резания газы обладают значительно большей проникающей способностью, чем жидкости. Они оказывают влияние на процессы, происходящие на контактных площадках, особенно при резании труднообрабатываемых материалов. Газовые среды могут обладать защитным или смазочным действием. В первом случае используются инертные газы (гелий, аргон). При обработке материалов, имеющих большое химическое сродство с кислородом и азотом, например титановых сплавов, на обработанной поверхности образуется охрупченный слой, и сопротивление деталей усталости резко снижается. Резание в среде аргона позволяет значительно повысить прочность деталей из титановых сплавов при переменных нагрузках.

В отличие от инертных активные газы (сероводород, хлор, кислород, углекислый газ) образуют на поверхностях заготовки и инструмента защитные пленки, снижающие интенсивность изнашивания и наростообразования и шероховатость обработанной поверхности.

В отдельных случаях газовые СОТС применяют в сжиженном виде для глубокого охлаждения обрабатываемых материалов.

При этом металл переводится из вязкого состояния в хрупкое, резко уменьшается работа пластической деформации. Глубокое охлаждение особенно эффективно при обработке труднообрабатываемых и вязких сталей.

Действие СОТС в процессе резания. Цель применения СОТС — снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента, улучшение качества обработанной поверхности и повышение производительности труда. Достичь этого можно направленным воздействием на элементарные физико-механические и химико-механические процессы, протекающие при резании металлов.

При использовании СОТС на поверхностях детали, инструмента и стружки образуются смазочные пленки сложного химического состава и свойств. В результате *смазочного* действия изменяются схватывание и силы трения при перемещении стружки и обрабатываемого металла по передней и задней поверхностям инструмента. Правильно подобранные в зависимости от свойств обрабатываемого и инструментального материалов СОТС могут уменьшать схватывание между ними и силы резания, улучшать условия контакта стружки с передней поверхностью. Соответственно увеличиваются период стойкости инструмента, производительность процесса, качество обработанной поверхности и др.

При шлифовании смазочное действие способствует повышению периода стойкости круга, позволяет избежать налипов, сократить цикл обработки путем увеличения бесприжоговой подачи.

В результате *охлаждающего* действия СОТС изменяется температурное поле инструмента, заготовки и стружки, что влияет на период стойкости инструмента, точность обработки, шероховатость и остаточные напряжения в поверхностном слое, форму стружки. В частности, теплообмен с СОТС уменьшает радиус заживания стружки, так как приводит к разным тепловым удлинениям ее наружной и прирезцовой сторон.

С увеличением толщины среза и скорости резания охлаждающее действие уменьшается. При лезвийной обработке влияние СОТС эффективно, когда скорость резания менее 150 м/мин, а при более высоких скоростях температура обрабатываемой заготовки стабилизируется и использование СОТС нецелесообразно.

СОЖ с высокими охлаждающими свойствами уменьшает температуру резания на 100...150 °С.

Моющее действие СОТС определяется степенью очистки обрабатываемой детали и инструмента в зоне резания от шлама, содержащего мелкие частицы стружки, обрабатываемого металла, инструментального материала, которые удерживаются на поверхности твердых тел электростатическими, электромагнитными и механическими силами. Чем меньше частицы шлама, тем легче они проникают в микронеровности на поверхности инструмента и детали и тем прочнее там удерживаются, ухудшая технологические показатели процесса обработки.

Эффективным моющим действием обладают вещества, уменьшающие поверхностное натяжение на границе раздела металл — жидкость. Образующиеся при этом пленки уменьшают прилипание шлама к поверхностям инструмента и детали. К поверхностно-активным веществам, обладающим моющим действием, относятся сульфаты, сульфанола, мыла, высшие жирные спирты и др. Повышение моющего действия СОТС можно обеспечить за счет увеличения скорости потока и расхода жидкости, подаваемой в зону резания в единицу времени.

Моющим действием можно назвать также удаление частиц стружки с базирующих и крепежных элементов автоматизированного оборудования, на которые подается жидкая технологическая среда (СОЖ) под давлением из специальных сопел перед установкой обрабатываемой детали.

Режущее и пластифицирующее действие СОТС проявляется в способности облегчать разрыв связей в обрабатываемом материале при внедрении инструмента и в облегчении пластического деформирования металла за счет локализации деформации в тонких поверхностных слоях. Это обеспечивается сложным воздействием поверхностно-активных веществ, входящих в состав СОТС, и способствует повышению стойкости инструмента и облегчению процесса резания.

Защитное и упрочняющее действие СОТС способствует повышению эксплуатационных характеристик деталей. Высоким защитным действием обладают, в частности, инертные газы. Обработка в их атмосфере титановых сплавов предохраняет поверхностный слой детали от разупрочнения в результате диспергирования в него атомов азота, водорода, кислорода. Это существенно повышает прочность сплавов при циклических на-

грузках. В ряде случаев путем правильного подбора компонентов технологической среды можно нанести на поверхность детали пленку ингибиторов коррозии.

При использовании некоторых СОТС обеспечивается упрочнение поверхностного слоя детали в результате измельчения внутризёрённой структуры его кристаллической решетки в поверхностно-активной среде.

Способы ввода технологической среды в зону резания. При подаче СОТС в зону резания она практически мгновенно попадает на площадки контакта рабочих поверхностей инструмента со стружкой и деталью. Проникновение это происходит под влиянием сил химического взаимодействия и через сеть субмикроскопических трещин и капилляров в зоне стружкообразования и на контактных площадках. Так, плексигласовый резец с полированными поверхностями может резать олово, свинец и другие мягкие материалы. Если сбоку от места контакта стружки с передней поверхностью резца нанести каплю окрашенной воды, можно заметить, как жидкость, быстро всасываясь, проникает в зону контакта и смачивает поверхности контактных площадок.

При скоростях резания свыше 100 м/мин контактная поверхность стружки сильно пластифицирована и размеры капилляров многократно уменьшаются. Смазывание в этом случае осуществляется воздухом или продуктами разложения СОЖ.

Эффективность применения СОТС и экономические показатели их использования в значительной степени определяются способом подвода в зону обработки. Наибольшее разнообразие их используется при подаче СОЖ. Самое широкое распространение получила подача СОЖ *свободно падающей струей* (рис. 2.38 а)

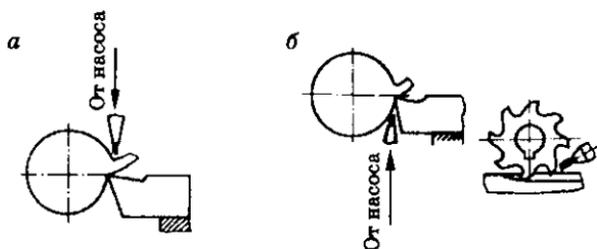


Рис. 2.38. Подача СОЖ свободно падающей струей (а) и через сопловые насадки (б)

под давлением 0,02...0,03 МПа, что объясняется в первую очередь простотой реализации способа. Его эффективность зависит от расхода СОЖ, размеров, формы и траектории струи. Последняя в любом случае должна перекрывать всю зону контакта инструмента с заготовкой.

При использовании указанного способа подачи СОЖ необходимо соблюдать следующие требования:

1) жидкость должна подводиться непрерывной струей с первого момента резания;

2) расход жидкости должен быть достаточно большим, но не более 15 л/мин, так как его дальнейшее увеличение нецелесообразно. С повышением давления жидкости период стойкости инструмента увеличивается, но до определенного предела. При различных видах обработки требуется разный расход охлаждающей жидкости. Так, например, при точении и сверлении жидкость рекомендуется подводить со скоростью 10...12 л/мин, фрезеровании — 10...20, черновых зуборезных работах — 8...10, чистовых — 2...3, при протягивании — 10... 12 л/мин;

3) характер подвода, направление и форма струи должны быть отрегулированы в соответствии с проводимой обработкой. Например, при нарезании резьбы с большой скоростью СОЖ должна подаваться обильной струей. Струю направляют в то место, где отделяется стружка. Это позволяет отводить наибольшее количество теплоты;

4) необходимо следить за состоянием и расходом СОЖ, своевременно менять ее и доливать в баки. Предельный срок работы эмульсии при обработке стали достигает 30, а чугуна и латуни — 15 дней.

Подача СОЖ под давлением 0,1...2 МПа *через сопловые насадки* (рис. 2.38, б) применяется в целях увеличения расхода СОЖ, проходящей через зону обработки, и вымывания из этой зоны стружки.

Последнее обстоятельство особенно важно для автоматизированного оборудования. Разновидностью подачи СОЖ под давлением является *струйно-напорный способ*. В этом случае тонкую струю СОЖ направляют в зону контакта инструмента с заготовкой со стороны задней поверхности лезвия. Эффективность подачи СОЖ под давлением значительно выше, чем при поливе

(свободно падающей струей), однако этот способ сложнее и дороже. Подача жидкости осуществляется с помощью насосов через фильтр и гибкий шланг с насадкой, имеющей отверстие диаметром 0,4...0,6 мм. Расстояние от выходного отверстия до лезвия резца должно быть как можно меньше, чтобы уменьшить рассеивание струи.

При охлаждении такого вида период стойкости резцов из быстрорежущей стали возрастает в 3–7 раз по сравнению с использованием обычного охлаждения и в 10–20 раз по сравнению с точением всухую. Применение высоконапорного охлаждения при обработке резцами, оснащенными твердым сплавом, менее эффективно. Период стойкости таких резцов возрастает лишь в 1,5 раза по сравнению с обычным охлаждением, да и то не всегда.

При использовании станков с ЧПУ получила распространение подача СОЖ *в распыленном состоянии* (рис. 2.39). В этом случае СОЖ с помощью сжатого воздуха распыляется на мельчайшие капельки и вместе с воздухом в виде тумана с большой скоростью (до 200...300 м/с) подается в зону резания. Расход жидкости очень мал. Период стойкости инструмента повышается в 2–4 раза по сравнению с обычным охлаждением свободно падающей струей и в 2 раза по сравнению с высоконапорным охлаждением. Кроме того, охлаждение распыленной жидкостью более удобно, так как не требует точного направления струи.

Следует отметить, что расход масел в десятки раз меньше, чем расход СОЖ на водной основе — соответственно 1...5 и 200...400 г/ч.

При обработке отверстий стержневыми инструментами широко применяется подача СОЖ *под давлением через каналы*

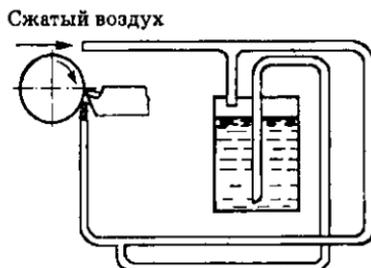


Рис. 2.39. Подача СОЖ в распыленном состоянии

в теле инструмента с выходом в зону резания (рис. 2.40). В результате облегчается не только надежный подвод СОЖ к контактным площадкам, но и удаление стружки из этой зоны. Такой способ охлаждения даже при обработке высокопрочных сталей позволяет увеличивать скорость резания на 25...40 %. Для подачи жидкости через внутренние каналы вращающихся инструментов применяются специальные патроны. Период стойкости сверл с внутренним подводом СОЖ повышается в 3–10 раз по сравнению с обычными сверлами.

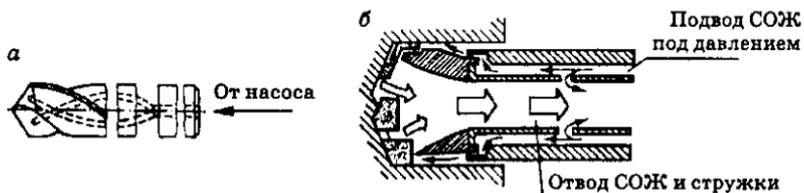


Рис. 2.40. Подача СОЖ через каналы в теле инструмента с выходом в зону резания:
а — спиральное сверло; б — эжекторное сверло

Аналогичные явления наблюдаются при подаче СОЖ через поры и каналы в шлифовальном круге за счет действия центробежных сил (рис. 2.41).

Твердые смазочные материалы вводятся в зону резания в результате периодической или непрерывной обмазки рабочих поверхностей инструмента. При шлифовании хорошо зарекомендовали себя круги, пропитанные такими материалами, как сера, углеводородные и кремнийорганические соединения.

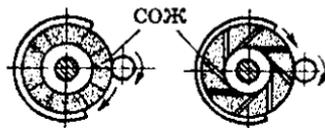


Рис. 2.41. Подача СОЖ через поры и каналы в теле шлифовального круга

2.9. Конструкции и расчеты токарных резцов

Основные типы и области применения резцов. *Резец* — это однолезвийный инструмент для обработки с поступательным или вращательным главным движением резания и возможностью движения подачи в любом направлении. Резец состоит из рабочей части, с помощью которой осуществляется резание (ее размеры определяют ресурс работы резца), и корпуса, имеющего вид стержня или диска.

Корпус включает рабочую часть, а сам крепится в технологическом оборудовании или в приспособлении. Кроме этих основных частей резец может иметь стружколомы, крепежные детали, опорные подкладки и пластины, регулировочные и установочные элементы.

Резцы можно классифицировать следующим образом:

- по виду оборудования — токарные, строгальные, долбежные, для автоматов или полуавтоматов, расточные для расточных станков, специальные для специальных станков;
- виду обработки — проходные, подрезные, расточные, фасочные, резьбовые, фасонные;
- материалу рабочей части — быстрорежущие, твердосплавные, керамические, из сверхтвердых материалов;
- установке относительно детали — радиальные, тангенциальные;
- сечению стержня корпуса — прямоугольные, квадратные, круглые, трапециевидные;
- направлению подачи — правые, левые;
- характеру обработки — черновые, чистовые, для тонкого точения;
- расположению рабочей части относительно корпуса — прямые, отогнутые, изогнутые, с оттянутой головкой;
- способу крепления рабочей части к корпусу — цельные, сварные (паяные), клееные, с механическим креплением пластин, с креплением пластин силами резания.

Конструкции резцов и резцовых вставок. Резцы с перетачиваемой режущей частью широко распространены в практике металлообработки и имеют разнообразные конструкции и геометрию. Стандартами оговорены размеры державок резцов и геометрия их режущей части. Рекомендации по оформлению передней поверхности резцов из быстрорежущей стали и твердосплавных резцов дают ГОСТ 18868-73* и ГОСТ 18877-73*. Эти поверхности могут быть плоскими с положительным передним углом (рис. 2.42, *а, з*), криволинейными с фаской (рис. 2.42, *б, ж*), криволинейными (рис. 2.42, *в*), плоскими с отрицательной фаской (рис. 2.42, *д*), плоскими с отрицательным передним углом (рис. 2.42, *е*).

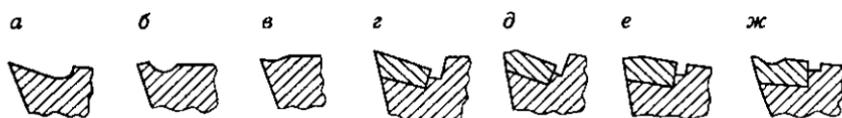


Рис. 2.42. Формы передней поверхности резцов

Широкое распространение в настоящее время получили сменные многогранные пластины (рис. 2.43). Согласно ГОСТ 19042-80 многогранные пластины делятся на три группы: 1) режущие; 2) опорные; 3) стружколомы. Первая группа непосредственно участвует в процессе резания, вторая группа служит опорой для пластин первой, обеспечивает их более точное базирование и увеличивает общий срок службы державки. Стружколомы используются для дробления стружки, когда его затруднительно обеспечить другими способами.

Одним из существенных факторов, характеризующих качество работы резцов и вставок с многогранными неперетачиваемыми пластинами, является надежность их базирования и закрепления. Стандартами ISO предусмотрены пять типов крепления сменных пластин: *С* — прихватом сверху; *М* — прихватом сверху с одновременным прижимом пластины к штифту; *Д* — прихватом, действующим одновременно сверху и в отверстии; *Р* — штифтом; *В* — винтом.

В настоящее время на базе указанных типов крепления разработано множество конструкций крепления пластин. Рассмотрим некоторые из них.

В случае *крепления прихватом сверху* (рис. 2.44, а) режущая пластина 4 прижимается к опорной пластине 3 и стенкам гнезда, выполненного в державке 1, с помощью прихвата 6 и винта 5. Винт 5 фиксируется в прихвате благодаря пружинной шайбе 7. Опорная пластина крепится к державке винтом 2 (или пружинным штифтом). В конструкции может быть использована стружколомающая пластина.

В резцах для точения по копиру (рис. 2.44, б) прихват 4 сложной формы прижимается к режущей пластине 2 винтом 5 через пружину 3. В державке 1 установлен подпружиненный штифт 6, обеспечивающий легкое и надежное снятие или поворот режущей пластины. Опорная пластина 8 крепится к державке плоской пружиной 7.

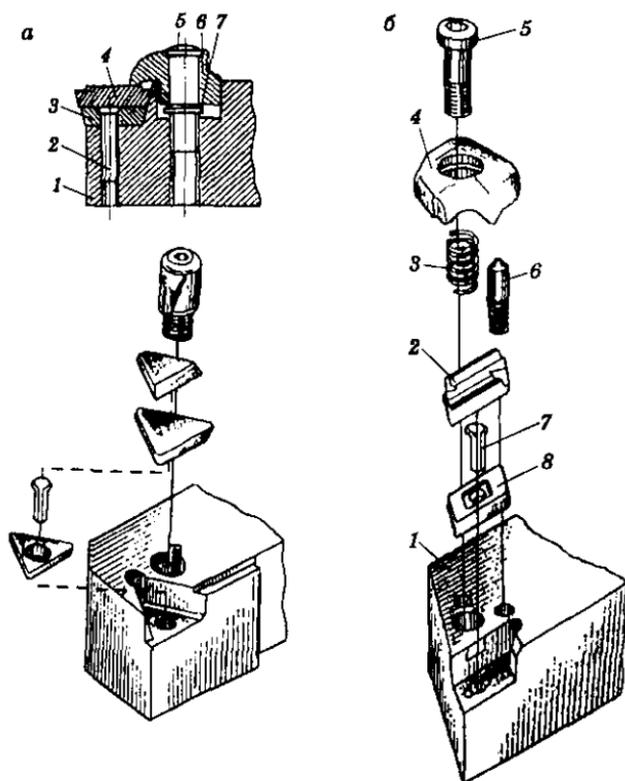
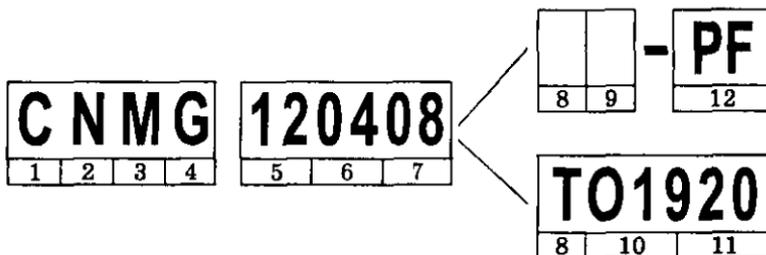


Рис. 2.44. Схемы крепления пластин прихватом сверху



1. Форма пластины	
80° C	55° D
55° K	R
S	T
35° V	80° W

2. Задний угол	
B	C
E	N
P	O — прочие

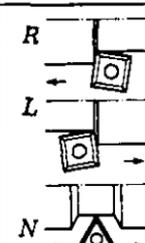
3. Класс точности		
Толщина s , мм	Допуск	
A, C, E, H, J, K, N	$\pm 0,025$	
G, M	$\pm 0,05$	
U	$\pm 0,08$	
Диаметр внешней окружности, мм	Класс точности	
	M	O
3,97...10,0	$\pm 0,05$	$\pm 0,08$
12,0; 12,7	$\pm 0,08$	$\pm 0,13$
15,875...20,0	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$

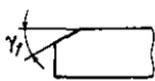
4. Тип пластины	
A	Q
G	R
M	T
N	W
X — специальная	

Рис. 2.43 Кодирование неперетачиваемых

5. Длина режущей кромки l , мм								6. Толщина пластины s , мм	
Диаметр вписанной окружности, мм	Обозначение							 	03 $s = 3,18$ мм T2 $s = 3,97$ мм 04 $s = 4,76$ мм 05 $s = 5,56$ мм 06 $s = 6,35$ мм 07 $s = 7,94$ мм
	C	D	R	S	T	V	W		
3,97			05			06			
5,0									
5,56						19			
6,0			06						
6,35	06	07				11	11		
8,0			08						
9,525	09	11	09	09	16	16	06	16	(теоретическая)
10,0			10						
12,0			12						
12,7	12	15	12	12	22	22	08		
15,875	16	19	15	15	27				
16,0			16						
19,05	19		19	19	33				
...

7. Радиус вершины r_s , мм		8. Форма режущей кромки	
	00 r_s — круглая		F острая
	04 $r_s = 0,4$ мм		E округленная
	08 $r_s = 0,8$ мм		T с фаской
	12 $r_s = 1,2$ мм		K с двойной фаской
	16 $r_s = 1,6$ мм		S с фаской и округлением
24 $r_s = 2,4$ мм			

9. Направление подачи		10. Ширина фаски, мм	
			010 $b_f = 0,10$ мм
			025 $b_f = 0,25$ мм
			070 $b_f = 0,70$ мм
	150 $b_f = 1,50$ мм		
	200 $b_f = 2,00$ мм		

11. Угол фаски	
	15 $\gamma_f = 15^\circ$
	20 $\gamma_f = 20^\circ$

пластин согласно норме ISO 1832:1999

Крепление *прихватом сверху с одновременным прижимом пластины к штифту* показано на рис. 2.45. Прихват 6 входит в гнездо державки 1 и прижимается с помощью винта 7 одновременно к стенкам гнезда и боковой плоскости режущей пластины 5. В результате происходит прижим пластины 5 к штифту 4, на котором помимо режущей установлена опорная пластина 3. Штифт 4 закреплен с помощью винта 2.

При креплении прихватом, действующим одновременно сверху и в отверстии пластины, силы прижима действуют в направлении, противоположном действию сил резания. Поэтому в процессе резания крепление может утратить свою жесткость, а прочность пластины снизится. В настоящее время используется новая конструкция, лишенная указанного недостатка. В конструкции, показанной на рис. 2.46, подпружиненный пружиной 7 прихват 5 плотно входит в отверстие режущей пластины 4 и прижимается с помощью винта 6 одновременно к скошенной поверхности державки 1 и передней поверхности режущей пластины 4. Опорная пластина 2 крепится в державке винтом 3. Прихват закреплен с помощью винта 6.

В случае *крепления штифтом* широко используется Г-образный рычаг 2 (рис. 2.47). Один его конец расположен в отверстии режущей пластины 5, другой — в выточке винта 6. При завинчивании последнего рычаг пово-

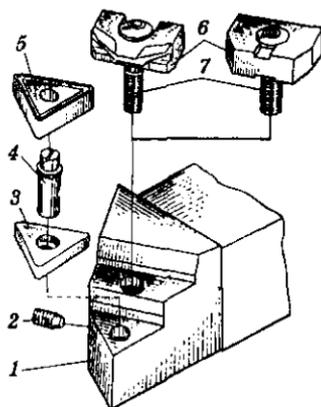


Рис. 2.45. Крепление пластины прихватом сверху с одновременным прижимом к штифту

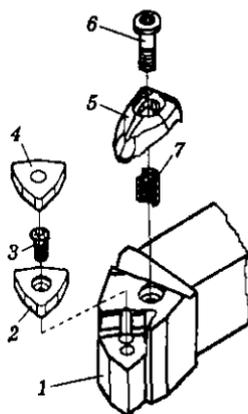


Рис. 2.46. Схема крепления пластины прихватом, действующим одновременно сверху и в отверстии пластины

рачивается вокруг своей вершины по часовой стрелке и прижимает режущую пластину к стенкам гнезда державки 1. Опорная пластина 3 крепится на рычаге 2 и в гнезде державки 1 с помощью пружинной втулки 4.

При *креплении винтом* (рис. 2.48) режущая пластина 4 прижимается к стенкам гнезда державки 1 с помощью винта 5, вворачиваемого в резьбовую втулку 3. Эта втулка прижимает к державке опорную пластину 2. Головка винта и отверстие режущей пластины выполнены коническими, а ось винта несколько смещена в сторону опорных стенок гнезда. В результате при завинчивании винта 5 режущая пластина 4 прижимается одновременно к опорным стенкам и основанию гнезда державки.

В *самоажимных механизмах крепления* пластины в процессе работы удерживаются силами резания, что упрощает конструкцию и повышает надежность закрепления. Сила, удерживающая режущие пластины на таких резцах, может быть меньше, равна или превышать (в том числе в десятки раз) силу резания, что достигается выбором конструктивных параметров державок

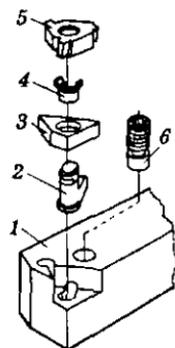


Рис. 2.47. Крепление пластины штифтом

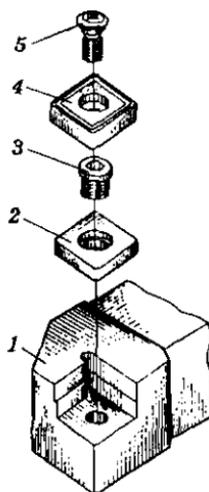


Рис. 2.48. Крепление пластины винтом

и комплектующих деталей. Закрепление и освобождение режущих пластин на резцах осуществляется надавливанием, легким ударом инструментального молоточка или эксцентриковым ключом (рис. 2.49).

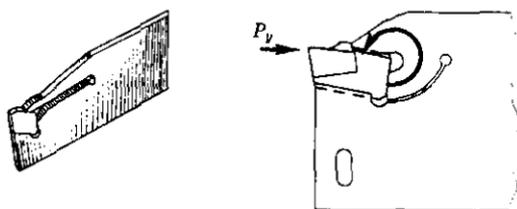


Рис. 2.49. Самозажимные механизмы крепления пластин (P_y — радиальная сила)

На базе указанных пяти типов крепления пластин разработано значительное количество конструкций сборных токарных резцов (рис. 2.50), многие из которых стандартизованы. С целью унификации их обозначений разработан стандарт ISO 5608:1995 (рис. 2.51).

Расчет резцов. В ходе проектирования резцов наряду с использованием нормативно-справочной литературы для выбора инструментального материала, формы пластины и геометрии режущей части, способа ее крепления в корпусе резца и т.д. не-

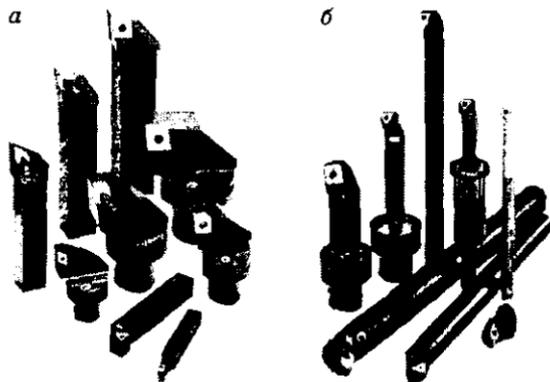


Рис. 2.50. Токарные резцы для наружного точения (а) и растачивания (б)

обходимо выполнить расчеты прочности корпуса и положения гнезда под пластину.

Корпус резца изготавливают, как правило, из сталей марок 45, 50, 40Х, иногда из углеродистых инструментальных сталей. Размеры поперечного сечения корпуса зависят от характера нагрузок и назначения резца. Критическое поперечное сечение задается в зоне крепления резца в резцедержателе станка. Ориентировочные значения поперечного сечения резцов при обработке сталей средней твердости приведены в табл. 2.1. Высота и ширина сечения прямоугольной формы унифицированы. Для черновых резцов используют соотношение высоты (H) и ширины (B) 1,25, для чистовых и получистовых — 1,6. Квадратное сечение обычно имеют расточные и автоматнo-револьверные резцы, круглое — расточные и иногда резьбовые, трапециевидное — резцовые вставки для автоматических линий и агрегатных станков.

Таблица 2.1

Размеры поперечного сечения резцов (угол в плане $\varphi = 45^\circ$)

Форма сечения	Площадь поперечного сечения срезаемого слоя, мм ²									
	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4,0	6,0	9,0	16,0	25,0
Прямоугольная ($H \times B$), мм	—	—	—	16×12	20×16	25×20	32×25	40×32	50×40	63×50
Квадратная, мм	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50

Рассматривая резец как защемленную балку с вылетом l , нагруженную главной силой резания P_z , легко получить размеры поперечного сечения:

- для корпусов прямоугольного сечения

$$BH^2 = \frac{6P_z l}{[\sigma]_{\text{н}}}; \quad \text{для } H = 1,6B \quad B = \sqrt[3]{\frac{2,3P_z l}{[\sigma]_{\text{н}}}}$$

- для квадратного сечения

$$B = \sqrt[3]{\frac{6P_z l}{[\sigma]_{\text{н}}}}$$

P	C	L	N	R	—	16	16	H	—	09
1	2	3	4	5		6	7	8		9

1. Способ крепления пластины				
Прихватом сверху	Прихватом сверху и через отверстие	Прихватом и Штифтом	Штифтом	Винтом
				
C	D	M	P	S

2. Форма пластины	
80° C 	55° D 
55° K 	R 
S 	T 
35° V 	80° W 

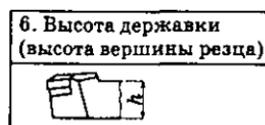
3. Форма режущей части					
75° B 	45° 45° D 	60° 60° E 	90° F 	90° G 	107°30' H 
93° J 	75° K 	95° L 	63° 63° N 	117°30' Q 	75° R 
45° S 	60° T 	93° U 	72°30' V 	85° Y 	X — прочие

Рис. 2.51. Система обозначений сборных токарных

• для круглого сечения

$$d \approx 3 \sqrt{\frac{10P_z l}{[\sigma]_и}}$$

где $[\sigma]_и$ — допустимое напряжение на изгиб материала державки (табл. 2.2).



резцов (ISO 5608:1995)

Таблица 2.2

Допустимые напряжения $[\sigma]_k$ для державок из углеродистой конструкционной стали, МПа

Состояние материала	Главный угол в плане, град					
	30	45	60	75	90	45 (отогнутый)
Закаленное	120	100	80	65	55	130
Незакаленное	240	200	160	130	110	260

Проверочный расчет корпуса на жесткость выполняется для инструментов с малыми поперечными сечениями и большим вылетом (отрезных, расточных). Стрела прогиба f не должна превышать 0,1 мм при черновой и 0,02 мм при чистовой обработке и находится по формуле

$$f = \frac{10P_2 l^3}{3EI},$$

где E — модуль упругости материала корпуса ($E = 200 \dots 220$ ГПа); I — момент инерции державки, равный $VH^3/12$ для прямоугольного сечения, $B^4/12$ — для квадратного и $0,05d^4$ — для круглого.

Если необходимо, расчеты корпуса на прочность и жесткость выполняются также для минимального поперечного сечения, которое находится на уровне гнезда под пластину.

Форма режущей части резцов с напаянными или клееными пластинами зависит от назначения резца, а также от формы и размеров пластин, которые, как правило, стандартизованы. В частности, размеры и назначение пластин из быстрорежущих сталей оговорены ГОСТ 2379-77, а из твердого сплава — ГОСТ 25393-90. При этом пластины из быстрорежущих сталей имеют упрощенную форму, а твердосплавные близки к форме заточенной режущей части (в ходе их изготовления сформированы углы резания). Пластины характеризуются длиной l , шириной b и толщиной s . Длина пластины определяет длину режущей кромки и зависит от глубины резания и главного угла в плане φ :

$$l = (1,5 \dots 2)t/\sin\varphi.$$

Ширина пластины определяет количество переточек по задней поверхности и площадь опоры пластины, ее значение ограничено габаритами корпуса и возможным возрастанием остаточных напряжений при пайке или склеивании. Толщина s влияет на прочность пластины и количество переточек по передней поверхности. Обычно она выбирается в зависимости от высоты корпуса H :

$$s = (0,18 \dots 0,25)H.$$

Форма гнезда должна соответствовать форме пластины и условиям ее работы. Наиболее простыми и распространенными являются открытые гнезда (рис. 2.52, а). Полузакрытые гнезда (рис. 2.52, б) используются для пластин криволинейной формы,

закрытые (рис. 2.52, *в*) — для пластин небольших размеров, например резьбовых и из сверхтвердых материалов, врезные (рис. 2.52, *г*) — для отрезных резцов.

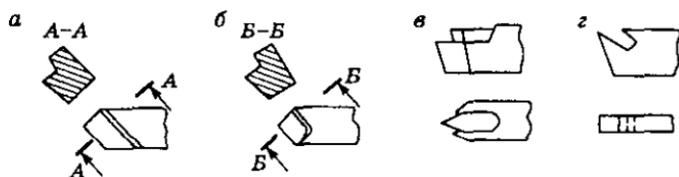


Рис. 2.52. Формы гнезда для неподвижно присоединяемых пластин

Расположение гнезда должно обеспечить приблизительно равное количество переточек резца по передней и задней поверхностям.

Размеры и положение гнезда под припаяваемую пластину принимаются в соответствии с литературой.

2.10. Конструкции и расчет фасонных резцов

Резцы с фасонной режущей кромкой применяют для обработки поверхностей вращения сложного профиля на токарных и револьверных станках, автоматах и полуавтоматах. По направлению движения подачи фасонные резцы бывают *радиальными*, *осевыми* и *тангенциальными* (рис. 2.53). По форме задней по-

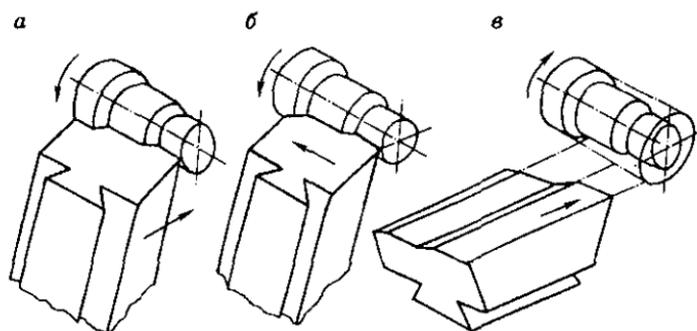


Рис. 2.53. Классификация фасонных резцов по направлению движения подачи:

а — радиальные; *б* — осевые; *в* — тангенциальные

верхности и особенностям конструкции фасонные резцы бывают стержневыми, призматическими и дисковыми (рис. 2.54).

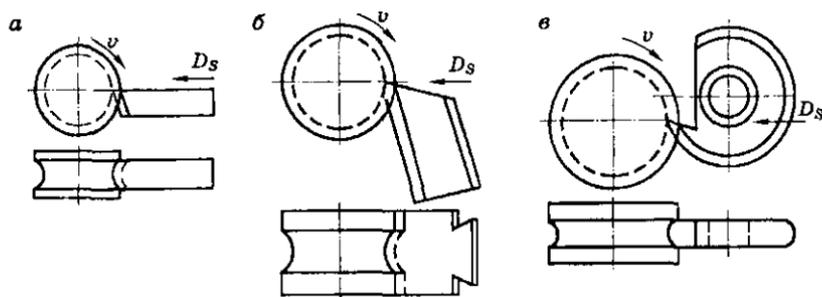


Рис. 2.54. Классификация фасонных резцов по конструктивным признакам:

a — стержневые; *б* — призматические; *в* — дисковые;
 D_s — движение подачи

Стержневые фасонные резцы подобны обычным токарным, но имеют фасонную режущую кромку, соответствующую форме поверхности детали. Такие резцы допускают малое количество переточек, поэтому используются в единичном и мелкосерийном производстве. Закрепляются они в суппорте как обычные резцы.

Призматические фасонные резцы представляют собой призму, одна из боковых граней которой — фасонная поверхность, а один из торцов — передняя поверхность. Задние углы на фасонной режущей кромке такого резца 1 обеспечиваются при его наклонной установке в державке 2 (рис. 2.55, *a*). Для базирования и закрепления резцы имеют хвостовик типа «ласточкин хвост», а для регулирования по высоте — винт со стороны опорного торца.

Разновидностью призматических фасонных резцов являются тангенциальные резцы, передняя поверхность которых срезана под углом $\varphi = 45 \dots 75^\circ$, т.е. их лезвие скошено, наклонено к оси детали под углом φ (рис. 2.55, *б*). Это весьма существенно меняет условия резания, так как обработка происходит не одновременно по всему профилю, а постепенно, по мере того как в соприкосновение с деталью вступают все новые точки режущей кромки. В результате уменьшаются силы резания, благодаря чему можно обрабатывать детали малой жесткости, не опасаясь поломок и вибраций. По сравнению с радиальными резцами

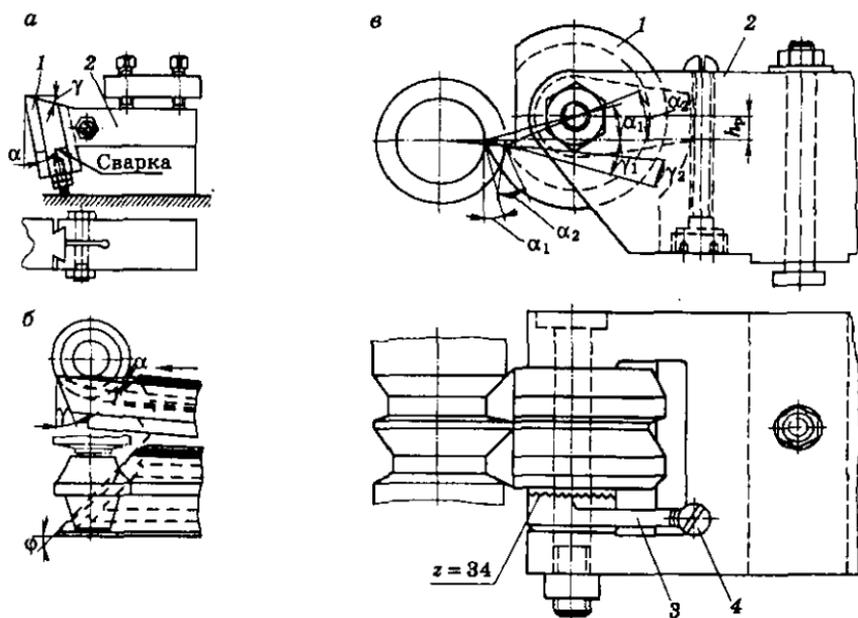


Рис. 2.55. Образование задних и передних углов на фасонных резцах

тангенциальные имеют значительно большую длину резания, а также переменные углы α и γ в каждой точке их рабочего хода.

Дисковые фасонные резцы представляют собой тело вращения с вырезанным угловым пазом для создания передней поверхности и пространства для размещения стружки. Резец крепится на оправке, ось которой располагают выше оси детали. Благодаря этому на фасонной режущей кромке создаются положительные задние углы (рис. 2.55, в). Дисковые резцы просты в изготовлении, допускают большое количество переточек (хотя крепятся менее жестко, чем призматические) и обрабатывают профили меньшей глубины. Регулирование вершины резца на высоту h_p первоначально производится поворотом резца 1, установленного в державке 2, относительно зубчатого сектора 3 с помощью зубчиков рифлений ($z = 34$) в разжатом состоянии, а окончательно — винтом 4 с червячной нарезкой уже в зажатом состоянии.

Для того чтобы процесс снятия стружки происходил при достаточно благоприятных условиях, фасонные резцы имеют оптимальные передние и задние углы.

Передний угол γ выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Для пластичных материалов он должен быть большим, чем для хрупких. Для фасонных резцов рекомендованы следующие величины передних углов (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Передние углы фасонных резцов, град.

Обрабатываемый материал	γ
Алюминий и медь	20...30
Мягкая сталь	20...25
Сталь средней твердости	12...20
Твердая сталь, мягкий чугун	8...12
Весьма твердая сталь, твердый чугун	5...8
Весьма твердый чугун, бронза, латунь	0...5

Задний угол α выбирается в зависимости от конструктивных особенностей резцов. При большом заднем угле ослабляется режущее лезвие, при малом — наблюдается рост сил трения задней поверхности фасонного резца о поверхность обрабатываемой детали. Поэтому для дисковых фасонных резцов α выбирается в пределах 10...15°, а для призматических — 12...14°. В отдельных случаях, например для резцов, предназначенных для затывания фасонных фрез, α увеличивают до 25...30°, так как в процессе работы истинная величина угла α будет намного меньше величины заднего угла заточки.

На участках лезвий, перпендикулярных базе резца, обычно для уменьшения трения делают поднутрения под углом ϕ_1 до 3...4° либо оставляют узкие ленточки (рис. 2.56).

Габаритные и присоединительные размеры фасонных резцов. Обычно эти размеры резцов определяются из конструктивных

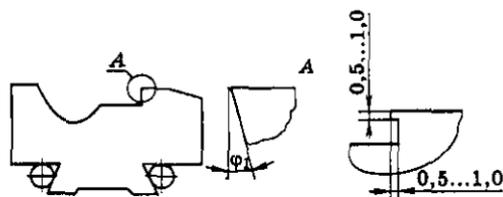


Рис. 2.56. Способы получения вспомогательных углов в плане

соображений в зависимости от глубины фасонного профиля изделия t_{\max} и длины профиля L .

Габаритный радиус дисковых резцов R определяют по следующей формуле:

$$R = \frac{t_{\max} + e + K + d_0/2}{\cos \alpha},$$

где e — глубина заточки по передней поверхности, необходимая для размещения стружки; K — толщина тела резца, необходимая для обеспечения его прочности ($K = 8 \dots 10$ мм); d_0 — диаметр посадочного отверстия; α — задний угол.

Величины e и d_0 выбираются в зависимости от t_{\max} . Конструктивные размеры резца можно выбрать в зависимости от глубины профиля изделия.

С правой стороны резца выполняют буртик с рифлениями для передачи крутящего момента и для поворота резца на $1/z$ после переточек и установки его вершины на высоту h_p (см. рис. 2.55) от горизонтальной оси резца. Если снятый слой при переточке не соответствует повороту на одно рифление, резец получает дополнительный поворот с помощью регулировочного червяка державки. Число зубчиков рифлений $z = 32 \dots 34$. Угол их профиля в нормальном сечении равен 90° . Для постоянства длины площадки при вершине зубчиков дно впадин между ними располагают к торцу буртика под углом.

Для того чтобы упростить изготовление круглого фасонного резца, его правую сторону делают без буртика, но просверливают отверстие под цилиндрический штифт, принадлежащий шайбе с рифлениями, которая по размерам и назначению соответствует описанному выше буртику резца.

Размеры рабочей части и высота профиля фасонного резца будут равны соответствующим размерам и высоте профиля обработанной детали, если углы γ и α равны нулю. Однако такие геометрические параметры не используются, так как резание в данном случае практически невозможно. Обычно фасонные резцы затачивают и устанавливают так, чтобы обеспечить положительное значение переднего и заднего углов. Передний угол γ как у призматического, так и у дискового фасонного резца

обеспечивается путем заточки. Задний угол α у последнего создается за счет смещения центра резца выше центра детали на высоту h_p (см. рис. 2.55, в), а у призматического — его наклоном (см. рис. 2.55, а).

При положительном значении углов γ и α глубина профиля детали, измеренная вдоль передней поверхности инструмента, не равна глубине профиля резца. Это указывает на то, что глубина профиля резца, измеряемая в плоскости, перпендикуляр-

а

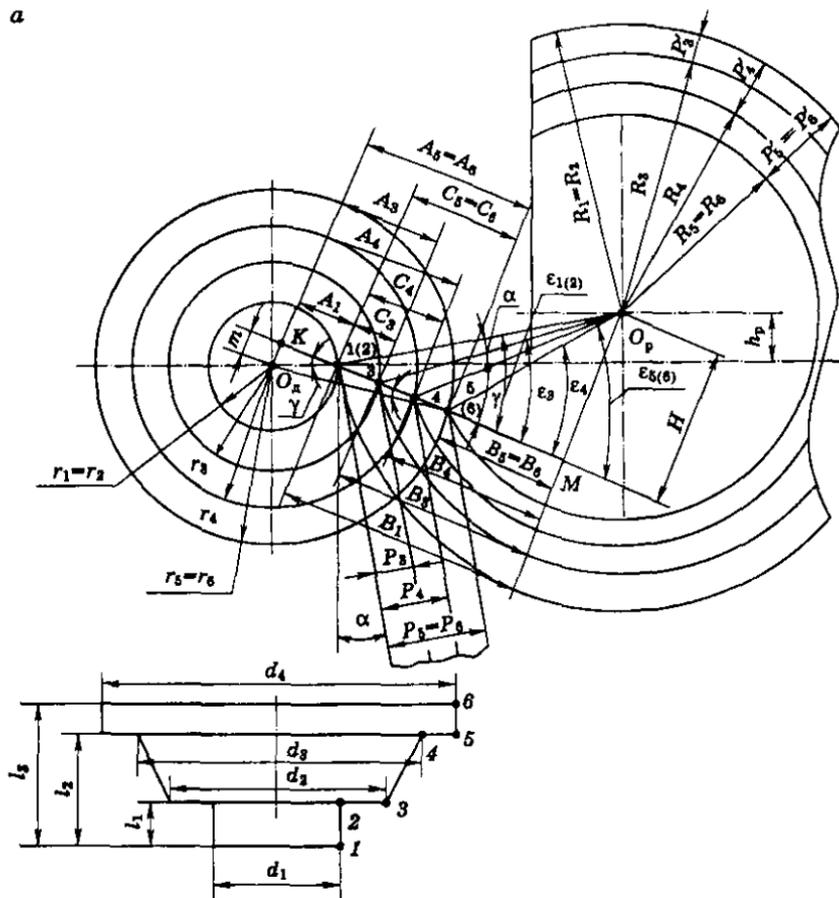
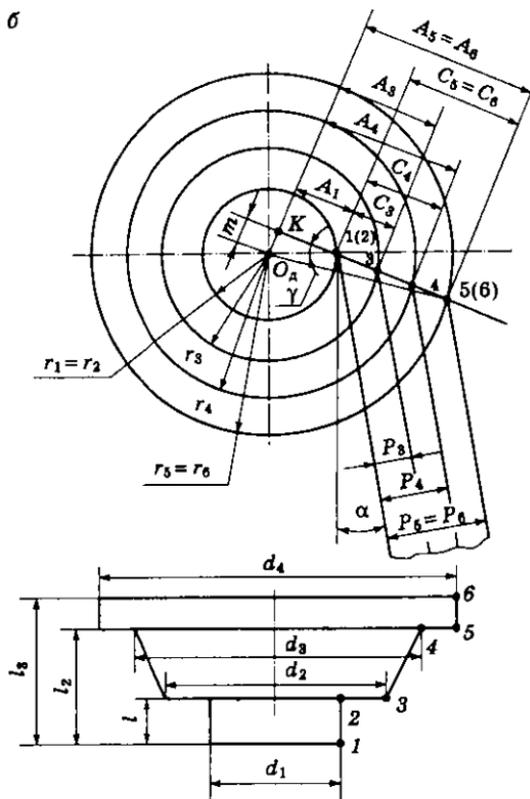


Рис. 2.57. Схемы к коррекционным расчетам круглого (а)

ной к его задней поверхности, от базовой линии, параллельной оси детали, отличается от глубины профиля детали, измеренной в радиальной плоскости.

Профиль детали, измеренный вдоль оси (длины l_1, l_2, \dots, l_n), в точности соответствует профилю резца.

Профиль фасонного резца определяется с помощью коррекционного расчета. На рис. 2.57 приведены схемы к коррекционному расчету круглого и призматического фасонных резцов.



и призматического (б) фасонных резцов для наружной обработки

Проведя дополнительные построения, получим значения параметров A и C с соответствующими индексами и расстояния B узловых точек передней поверхности 1 (2), 3, 4, 5 (6) до центра детали и до точки 1.

Независимо от конструктивного исполнения реза искомые размеры C определяются по одним и тем же формулам в следующей последовательности:

- 1) $m = r_1 \sin \gamma$,
- 2) $A_1 = r_1 \cos \gamma$,
- 3) $\gamma_i = \arcsin(m/r_i)$,
- 4) $A_i = r_i \cos \gamma_i$,
- 5) $C_i = \pm(A_i - A_1)$,

где «+» — для резцов для наружной обработки; «-» — для резцов для внутренней обработки; 1 — базовая точка реза; r_1 — радиус базовой точки реза на детали; 2, ..., i — любая (вторая, i -я) точка реза, формирующая на детали окружности радиусов r_2, r_3, \dots, r_i ; γ — передний угол реза в базовой точке 1; γ_i — передний угол реза в точках 2, 3, ..., i ; C_i — искомый размер на данном этапе расчета.

Расчет по формулам (1) и (2) производится один раз, а по формулам (3)...(5) — для всех точек профиля детали, кроме точки 1.

При коррекционном расчете размеров профиля призматического фасонного реза в нормальном сечении исходными данными являются углы α и γ , а также размеры C_2, \dots, C_i , найденные в общей части коррекционного расчета. Искомые размеры профиля P_i определяются по следующей формуле:

$$P_i = C_i \cos(\alpha + \gamma).$$

При расчете круглых фасонных резцов заданными величинами являются углы α, γ и наружный радиус реза R_1 , соответствующий базовой точке 1.

Размеры C_2, \dots, C_i , лежащие в передней плоскости реза, найдены в общей части расчета. Задача коррекционного расчета сводится к определению радиусов реза, соответствующих другим точкам профиля детали, т.е. R_2, \dots, R_i , а также высотных размеров профиля в осевом сечении реза P'_i .

Расчет производится по формулам в следующей последовательности:

- 1) $H = R_1 \sin(\alpha + \gamma)$,
- 2) $B_1 = R_1 \cos(\alpha + \gamma)$,
- 3) $B_2, \dots, B_i = B_1 - C_2, \dots, C_i$,
- 4) $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i = \arctg(H/B_2, \dots, B_i)$,
- 5) $R_2, \dots, R_i = H/\sin\varepsilon_2, \dots, \sin\varepsilon_i$,
- 6) $R'_2, \dots, P'_i = R_1 - R_2, \dots, R_i$.

Расчет по формулам (1), (2) производится один раз, а по формулам (3)...(6) — для всех точек профиля детали.

Размер H служит для контроля правильности заточки реза.

2.11. Конструкции расточных инструментов

В настоящее время наряду с обычными стержневыми расточными резцами используются расточные резцы, устанавливаемые в специальных борштангах, расточные пластины, блоки и головки. *Резцы и вставки, установленные в борштангах*, имеют квадратное или круглое с лыской поперечное сечение. В отдельных случаях в торце корпуса предусмотрен регулировочный винт. Закрепление резцов производится с помощью винтов или штифтов, в ряде случаев предусматривается точная установка на заданный размер и подналадка резца в процессе работы с помощью регулировочного винта. Например, регулировка резца 2 в борштанге на размер x производится регулировочным винтом 5 (рис. 2.58). Резец крепится с помощью винта 3, а винт 4 служит для фиксации положения винта 5 после установки на размер. Настройка на размер обычно производится в инструментально-раздаточной кладовой.

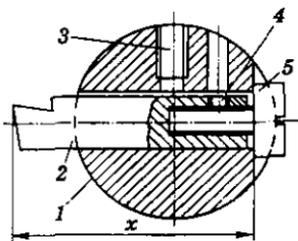


Рис. 2.58. Схема регулировки расточного резца на размер

Для растачивания отверстий диаметром свыше 40 мм применяются *расточные пластины* из быстрорежущей стали или оснащенные твердым сплавом, цельные (рис. 2.59, а) или сборные (рис. 2.59, б). Пластины работают только торцовыми кромками, а цилиндрические (за исключением небольшого участка, прилегающего к торцу) в работе не участвуют. Пластины жестко закрепляются в пазу борштанги с помощью центрирующих фасок и пазов и зажимаются клиньями, винтами, штифтами, гайками

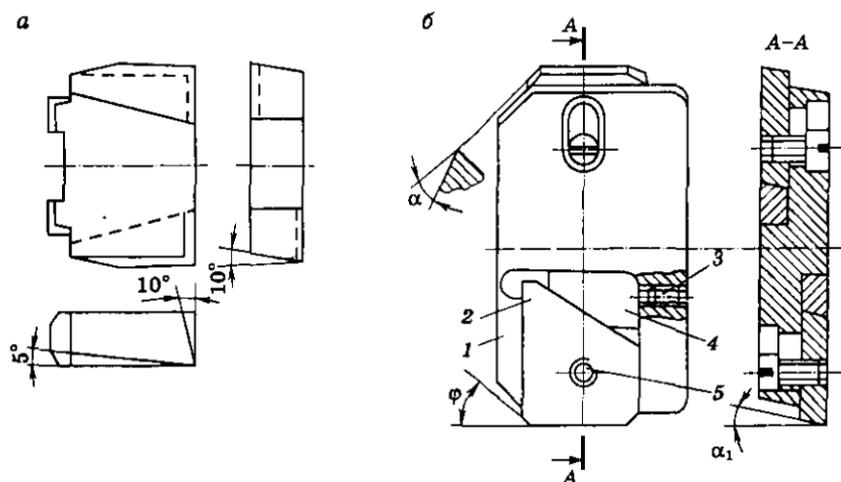


Рис. 2.59. Конструкции жестких (а) и регулируемых (б) расточных пластин

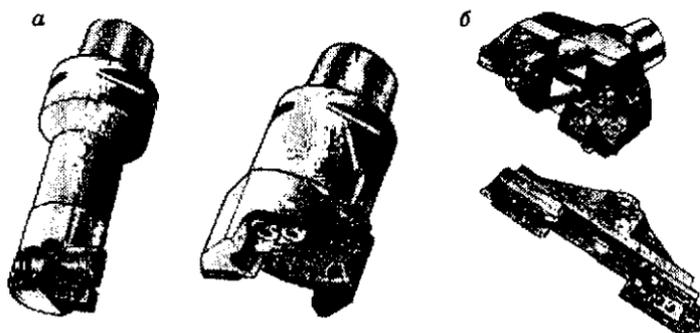


Рис. 2.60. Конструкции жестких (а) и регулируемых (б) расточных блоков

либо имеют возможность самоустановки и центрирования по обрабатываемому отверстию в радиальном направлении. Это компенсирует погрешности базирования заготовки и предшествующей обработки, а также позволяет получить точное отверстие при снятии весьма малого припуска. Плавающие пластины, как правило, регулируются на размер. Например, в конструкции, приведенной на рис. 2.59, б, резцы 2 устанавливаются в корпусе 1 на размер с помощью регулировочных винтов 3 и вкладышей со скосами 4. Закрепление резцов производится винтами 5.

Расточные блоки, состоящие из корпуса и одной или нескольких пар вставных регулируемых резцов, используются для предварительной и окончательной обработки отверстий в корпусных деталях. Встречаются разнообразные конструкции блоков, различающиеся способами закрепления и регулирования резцов в корпусе, а также способами центрирования и закрепления корпуса в борштанге (рис. 2.60).

2.12. Расчет режимов резания при точении

Существует строго определенная последовательность расчетов режима резания.

1. Прежде всего выбирают инструментальный материал, конструкцию инструмента и геометрические параметры его режущей части. Материал режущей части выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, состояния поверхности заготовки, условий резания (общие рекомендации по выбору инструментальных материалов приведены в гл. 1). Геометрические параметры инструмента назначаются в зависимости от свойств обрабатываемого материала, жесткости технологической системы, вида обработки (черновая, чистовая или отделочная) и других условий резания.

2. Назначают глубину резания с учетом припуска на обработку. При черновой обработке желательно назначать глубину резания, обеспечивающую срезание припуска за один проход. Количество

проходов свыше одного при черновой обработке следует допускать в исключительных случаях (при снятии повышенных припусков). Полуцистовая обработка часто производится в два прохода. Первый (черновой) осуществляется при глубине резания $t = (0,6 \dots 0,75)h$, а второй (окончательный) — при $t = (0,3 \dots 0,25)h$. Обработка в два прохода в этом случае вызвана тем, что при снятии слоя толщиной свыше 2 мм за один проход качество обработанной поверхности низкое, а точность ее размеров недостаточная. При чистовой обработке в зависимости от точности и шероховатости обработанной поверхности глубину резания назначают в пределах 0,5...2 мм на диаметр, а при обработке с шероховатостью менее $Ra = 1,25$ — в пределах 0,1...0,4 мм.

3. Выбирают подачу S_0 , мм/об. При черновой обработке она устанавливается с учетом жесткости технологической станочной системы, прочности детали, способа ее крепления (в патроне, в центрах и др.), прочности и жесткости рабочей части режущего инструмента, прочности механизма подачи станка, а также установленной глубины резания. При чистовой обработке назначение подачи необходимо согласовывать с заданной шероховатостью обработанной поверхности и качеством точности, учитывая при этом возможный прогиб детали под действием сил резания и погрешности геометрической формы обработанной поверхности.

После выбора нормативной подачи выполняют проверочные расчеты. Например, подачу, выбранную для черногого точения с заданной глубиной резания, проверяют по осевой силе резания и прочности механизма подачи станка. При этом для данного обрабатываемого материала определяют глубину резания и подачу, осевую силу и сопоставляют ее с силой, которую допускает механизм подачи станка и которая указывается в его паспорте. Осевая сила резания должна быть меньше или, в крайнем случае, равна силе, допускаемой механизмом подачи:

$$P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} K_{P_x} \leq P_{ст}.$$

Если выбранная подача не удовлетворяет условиям прочности или жесткости инструмента и детали, необходимо понизить ее до уровня допустимой. Уменьшение подачи снижает силу резания, но глубина резания оказывает на силу более значитель-

ное влияние. Тем не менее уменьшают именно подачу, так как при уменьшении глубины сразу появляется необходимость во втором проходе и возрастает время обработки. Кроме того, глубина резания только в малой степени влияет на изменение периода стойкости инструмента и v_T , тогда как при уменьшении подачи v_T возрастает.

Необходимо отметить, что на практике проверочные расчеты по формулам выполняются редко ввиду их сложности. При необходимости используются таблицы предельно допустимых подач, приводимые в ряде справочников.

Принятая подача уточняется по паспорту станка. При этом принимают ближайшую из имеющихся на станке подач. Допускается принимать ближайшую большую, если она превышает нормативную не более чем на 10 %.

4. Определяют скорость резания. Скорость резания, допустимая режущим инструментом при определенном периоде его стойкости, зависит от глубины резания, подачи, материала режущей части инструмента, его геометрических параметров, обрабатываемого материала, вида обработки, охлаждения и других факторов.

При данных глубине резания, подаче и периоде стойкости можно рассчитать скорость резания при точении:

$$v = \frac{C_v}{T^m x_v y_v} K_v,$$

где C_v — коэффициент, учитывающий условия работы инструмента, принятые в справочнике за основу; K_v — коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу; x_v, y_v — показатели степени; m — показатель относительной стойкости.

Нормативные периоды стойкости T принимаются с учетом экономических факторов и производственного опыта эксплуатации инструментов. Определяющими могут являться требования производительности обработки, ее экономичности, минимума затрат на эксплуатацию инструмента и др.

Для современных резцов, оснащенных сменными неперетачиваемыми пластинами, рекомендуются периоды стойкости $T = 15$ мин.

При многоинструментной обработке, например на токарных автоматах и полуавтоматах, периоды стойкости должны быть больше, чем при одноинструментной обработке на универсальных станках, так как значительно увеличиваются затраты времени на их смену и подналадку, их суммарная стоимость и расходы на переточку. В наиболее простом случае, когда одновременно работает n одинаковых резцов в совершенно одинаковых условиях, принимают $T_{\Sigma} = nT$, где T — оптимальный период стойкости при одноинструментной обработке. Как правило, на станке одновременно работают различные по конструкции и нагруженности инструменты и определение наивыгоднейшего периода их стойкости сложно и трудоемко. Поэтому, а также в связи с необходимостью уточнения режимов резания непосредственно в ходе обработки партии деталей обычно используют упрощенные методы расчета. Они базируются на том, что в наладке имеется небольшое количество инструментов с самыми низкими периодами стойкости, тогда как у некоторых инструментов они очень велики. Инструмент, период стойкости которого будет минимальным, называется *лимитирующим*, т.е. ограничивающим режим резания. Такой инструмент поднастраивается и меняется наиболее часто. Связанные с этим простои сильно влияют на производительность станка и стоимость обработки. Поэтому при расчете режимов резания для многоинструментных станков за основу принимается лимитирующий инструмент. Именно для него назначают скорость резания, обеспечивающую требуемый период стойкости. При этом необходимо помнить, что данный период должен быть значительно выше, чем для одноинструментной обработки, поскольку учитывает сложность наладки и количество входящих в нее инструментов. Для одношпиндельных прутковых токарных автоматов период стойкости принимают до 120 мин машинной работы, а для многошпиндельных — 150 мин. Это составляет соответственно 3–4 и 2–3 замены инструмента в течение рабочей смены.

Значения периодов стойкости измеряются в минутах машинной работы и существенно отличаются по сравнению с одноинструментной обработкой, когда период стойкости измеряется в минутах времени резания. В первом случае длины рабочих ходов инструмента $L_{р.х}$ могут быть значительно больше, чем длина резания L_p (рис. 2.61). Их соотношение определяется *коэффициентом*

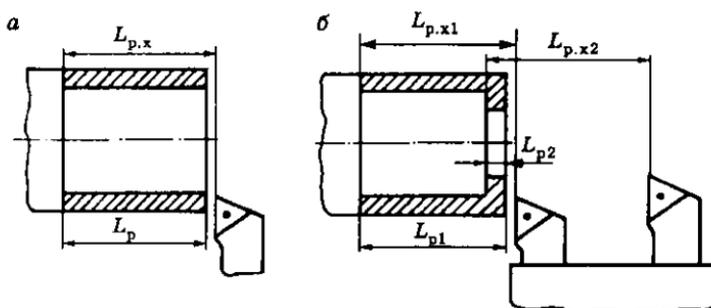


Рис. 2.61. Соотношение длин резания и рабочего хода при обработке: а — одноинструментной; б — многоинструментной

том времени резания $\lambda = L_p/L_{p,x} = T/T_m$, где T_m — период стойкости в минутах машинной работы. Если $\lambda \geq 0,7$, его можно не учитывать и принимать $T = T_m$. Если же $\lambda < 0,7$, в дальнейших расчетах скорость резания находят для периода стойкости $T = \lambda T_m$.

В справочниках значения скоростей резания обычно приводятся в таблицах с учетом определенных условий работы. Если конкретные условия отличаются от тех, для которых составлена данная нормативная таблица, то при выборе скорости резания табличные значения умножают на поправочные коэффициенты, учитывающие свойства обрабатываемого и инструментального материалов, особенности обработки и т.д.

По расчетной скорости резания подсчитывают частоту вращения шпинделя станка: $n = 1000v/(\pi D)$. Полученное значение n уточняют по паспорту станка и принимают ближайшее из имеющихся на станке.

По действительной частоте вращения шпинделя определяют фактическую скорость резания: $v_\phi = \pi D n_\phi / 1000$.

5. При черновой обработке проверяют выбранный режим резания по мощности станка. В этом случае должно соблюдаться соотношение

$$N_p \leq \eta N_{ст},$$

где N_p — мощность резания, определяемая по таблицам или формулам путем использования значений P_z и v (см. § 2.4); η — коэффициент полезного действия привода главного движения; $N_{ст}$ — мощность электродвигателя.

Если окажется, что мощности электродвигателя станка, на котором должна производиться обработка, не хватает, надо выбрать более мощный станок. Если это невозможно, необходимо уменьшить выбранные значения v или S . Уменьшение v выгоднее, так как машинное время будет таким же, как и при уменьшении S , но зато период стойкости инструмента значительно возрастет.

6. Определяют основное время каждого прохода:

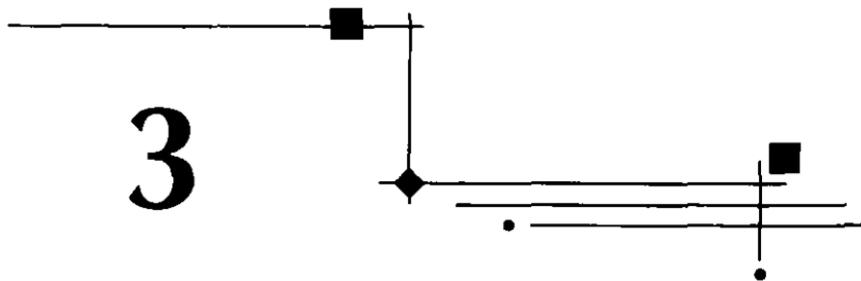
$$T_0 = \frac{L}{nS_0} = \frac{l_1 + l + l_2}{nS_0},$$

где L — длина рабочего хода, мм; n — частота вращения детали, мм/об; S_0 — подача, мм/об; l — длина обрабатываемой поверхности; l_1, l_2 — длины соответственно врезания и перебега, которые определяют по таблицам справочников или используя зависимости

$$l_1 = \frac{t}{\operatorname{tg}\varphi} + (0,5 \dots 2) \text{ мм}; \quad l_2 = 2 \dots 5 \text{ мм}.$$

Здесь t — глубина резания; φ — главный угол резца в плане. Величина $(0,5 \dots 2)$ мм, используемая при расчете l_1 , позволяет исключить подвод инструмента непосредственно к детали на ускоренном ходу.

3



ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ ОСЕВЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

3.1. Сверление



3.1.1. Назначение и типы сверл. Конструктивные элементы спирального сверла

Сверло представляет собой осевой режущий инструмент для обработки отверстий в сплошном материале либо для увеличения диаметра имеющегося отверстия (расверливания) при двух одновременно происходящих движениях — вращении детали или сверла вокруг его оси и поступательном движении подачи вдоль оси.

В промышленности применяются следующие основные типы сверл: спиральные, перовые, специальные для глубоких отверстий, головки для кольцевого сверления, центровочные.

Наиболее широкое распространение получило *спиральное (винтовое) сверло* для сверления отверстий: а) не требующих дополнительной обработки; б) под зенкерование или растачивание; в) под развертывание; г) под нарезание резьбы метчиком.

Спиральные сверла позволяют обеспечить обработку отверстий квалитетов точности 11–12 с шероховатостью поверхности $Rz = 20...80$ мкм. Сверла изготавливаются из быстрорежущих

сталей, твердых сплавов и сверхтвердых инструментальных материалов. Основные типы и размеры спиральных сверл стандартизованы. В ГОСТ 885-77 приведены рекомендации по выбору диаметров сверл в зависимости от назначения.

Сверло состоит из рабочей части, шейки и хвостовика (рис. 3.1). Конический или цилиндрический *хвостовик* служит для передачи крутящего момента и закрепления сверла в шпинделе станка, удлинителе или патроне. Для сверл диаметром свыше 6 мм хвостовик чаще всего имеет форму конуса Морзе и заканчивается лапкой. *Лапка* — плоский конец конического хвостовика, предназначенный для крепления сверла в прорези конического отверстия шпинделя станка или приспособления и выбивания сверла из отверстия.

Шейка — промежуточная часть между хвостовиком и рабочей частью сверла. Она имеет меньший диаметр, чем рабочая часть. Шейка необходима для выхода шлифовального круга при шлифовании рабочей части и хвостовика сверла.

Рабочая часть состоит из режущей и направляющей частей. Условия работы сверла определяются главным образом конструкцией его *режущей части*. Она имеет два лезвия (пера), которые соединены между собой *сердцевиной*, расположенной вдоль оси сверла. Это центральная часть сверла, расположенная между канавками от вершины сверла до хвостовика. Размер сердцевины соответствует диаметру окружности, касательной к поверхности канавок, и может увеличиваться по направлению к хвостовику для большей прочности и жесткости сверла.

Главные задние поверхности лезвий образуются при заточивании сверла по конической, винтовой или плоской поверхности. *Передние поверхности* лезвий сверла имеют винтовую форму, по ним стружка транспортируется из зоны резания, а смазочно-охлаждающая жидкость поступает в зону резания. Пересечения передних поверхностей (винтовых канавок) с главными задними поверхностями образуют *главные режущие кромки*, которые должны быть расположены симметрично относительно оси сверла. При пересечении двух задних поверхностей на сердцевине образуется *поперечная кромка*, или *перемычка*.

Направляющая часть обеспечивает ориентацию сверла в кондукторной втулке или обрабатываемом отверстии и служит ре-

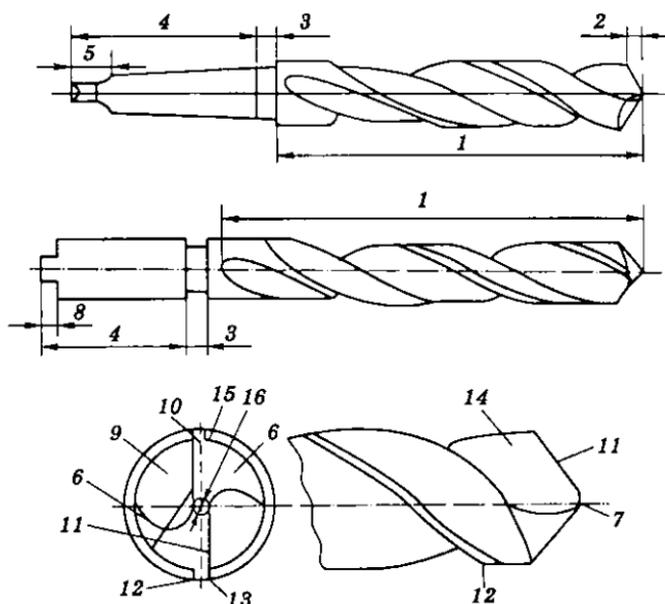


Рис. 3.1. Конструктивные элементы спирального сверла:

1 — рабочая часть; 2 — режущая часть; 3 — шейка; 4 — хвостовик; 5 — лапка; 6 — зуб; 7 — поперечная кромка; 8 — поводок; 9 — стружечная канавка; 10 — задняя поверхность; 11 — режущая кромка; 12 — ленточка; 13 — кромка ленточки; 14 — передняя поверхность; 15 — спинка зуба; 16 — сердцевина

зервом для образования режущей части при переточках сверла. Направляющая часть сверла для уменьшения трения соприкасается с отверстием только по узким шлифованным винтовым *ленточкам*, которые расположены на образующей поверхности наружного диаметра сверла. Ленточки шлифуются по окружности с очень малой (0,03...0,15 мм на 100 мм длины сверла) конусностью по направлению к хвостовику. Малая ширина и обратная конусность ленточек уменьшают трение между сверлом и отверстием. Ленточки являются вспомогательными задними поверхностями лезвий сверла. Пересечения передних поверхностей (винтовых канавок) со вспомогательными задними поверхностями (ленточками) образуют вспомогательные режущие кромки.

Ленточка переходит в спинку зуба, имеющую меньший диаметр, обычно 0,9...0,95 от диаметра сверла.

3.1.2. Геометрические параметры спирального сверла

Углы в плане сверла, как и других инструментов, рассматриваются в основной плоскости. У сверла она проходит через его ось и может изменять свое положение, поскольку вектор скорости резания для каждой точки сверла имеет свое направление. Поэтому обычно рассматривается точка, лежащая на периферии сверла.

Главным углом в плане ϕ называется угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. От угла ϕ зависит ширина и толщина срезаемого слоя, условия теплоотвода, прочность режущей части сверла.

Для упрощения измерения углов на сверлах указывается не ϕ , а 2ϕ — угол между двумя главными режущими кромками. Величину угла 2ϕ (рис. 3.2) назначают в зависимости от свойств обрабатываемого материала (табл. 3.1).

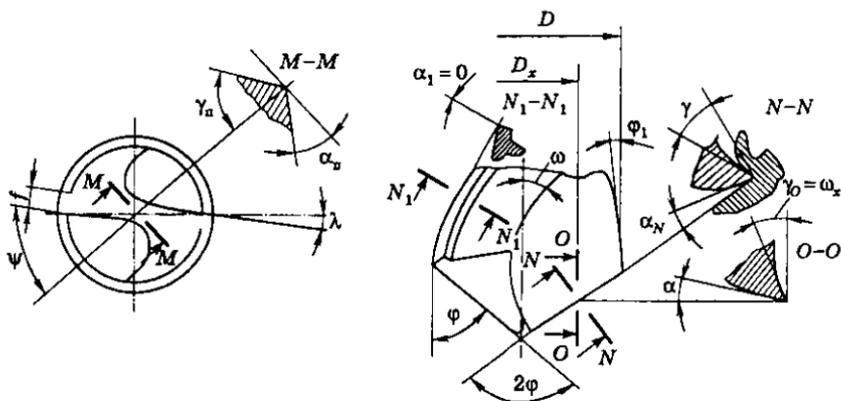


Рис. 3.2. Геометрия спирального сверла

В основной плоскости рассматриваются также вспомогательные углы в плане ϕ_1 . **Вспомогательным углом в плане ϕ_1** называется угол между проекцией вспомогательной режущей кромки (ленточки) на основную плоскость сверла и рабочей плоскостью. Чтобы избежать защемления сверла в просверленном отверстии, диаметр рабочей части сверла уменьшают по направлению к хвостовику, т.е. выполняют обратную конусность в пределах 0,03...0,15 мм на 100 мм длины сверла. В этом случае угол ϕ_1 не превышает $10'$.

Таблица 3.1

Значение угла 2φ при вершине сверла
из быстрорежущей стали, град.

Обрабатываемый материал	2φ
Сталь, чугун, твердая бронза	116...120
Латунь, мягкая бронза	130
Алюминий и его сплавы	140
Нержавеющие и жаропрочные стали, титановые сплавы	120...140
Красная медь	135
Пластмассы	80...110

Угол φ_1 можно определить по следующей формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{D - D_1}{2L},$$

где D , D_1 — диаметр сверла соответственно в начале и в конце направляющей части; L — длина направляющей части.

Углом наклона винтовой канавки ω называется угол между осью сверла и касательной к винтовой линии ленточки. В различных точках режущей кромки сверла этот угол различен:

$$\operatorname{tg}\omega_x = \frac{D_x}{D} \operatorname{tg}\omega,$$

где D , D_x — развертки окружностей, на которых лежат точки режущей кромки.

Угол ω выбирают в зависимости от диаметра сверла D , свойств обрабатываемого материала, глубины просверливаемого отверстия и других факторов. Спиральные сверла изготавливаются с углами $\omega = 15...60^\circ$.

Главным передним углом γ называется угол между касательной к передней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и нормалью в той же точке к поверхности резания. Поскольку угол наклона винтовой канавки, являющейся передней поверхностью сверла, уменьшается при приближении к оси сверла, то и передний угол для разных точек режущей кромки будет

переменным. Он тем меньше, чем ближе рассматриваемая точка к оси сверла. Передний угол γ в нормальной плоскости $N-N$ можно найти из упрощенной формулы:

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \frac{D_x \operatorname{tg} \omega}{D \sin \varphi}.$$

Переменный, резко изменяющийся передний угол является большим недостатком конструкции спирального сверла. Отрицательный передний угол у сердцевинки (рис. 3.3) создает тяжелые условия резания поперечной кромкой, что приводит к сильному повышению усилия подачи. По экспериментальным данным, свыше 50 % общего усилия подачи приходится на работу поперечной кромки. Это заставляет изыскивать способы улучшения конструкции режущей части путем специальных заточек.

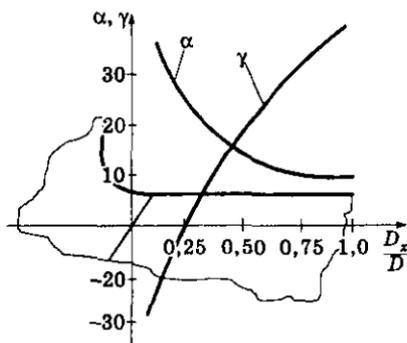


Рис. 3.3. Изменения переднего и заднего углов спирального сверла вдоль главной режущей кромки

Главным задним углом сверла α называется угол между касательной к задней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и плоскостью резания (см. рис. 3.2). Если сверло только вращается, траекторией движения каждой точки режущей кромки является окружность. Так как сверло имеет подачу вдоль оси, траекторией движения каждой точки режущей кромки будет пространственная винтовая линия с шагом, равным подаче на зуб. Действительное значение заднего угла α_d будет меньше статического.

Чем ближе точка режущей кромки расположена к оси сверла, тем значительнее уменьшается задний угол сверла в процессе работы (см. рис. 3.3). Уменьшение действительного заднего угла или его отсутствие приводит к увеличению трения и изнашиванию или же делает работу сверла невозможной. Таким образом, при заточке приходится обеспечивать такое значение заднего угла, которое необходимо для каждой точки режущей кромки, т.е. затачивают заднюю поверхность с переменным углом. *Наибольшее значение задний угол должен иметь у оси сверла, наименьшее — на периферии.* При этом обеспечивается примерное равенство углов заострения вдоль режущей кромки сверла. На чертежах задний угол сверла задают для периферийной точки режущей кромки, так как в этой точке его легче измерить.

Вспомогательный задний угол сверла α_1 измеряется в плоскости N_1-N_1 , нормальной к вспомогательной режущей кромке (кромке ленточки). Так как ленточка шлифуется по окружности, вспомогательные задние углы сверла α_1 равны нулю (см. рис. 3.2).

Углом наклона главной режущей кромки λ называется угол между режущей кромкой и прямой, проходящей через вершину режущей кромки параллельно основной плоскости (см. рис. 3.2). Если крайняя точка режущей кромки самая низкая, то угол λ считается положительным, если же самая высокая — отрицательным.

Углом наклона поперечной кромки ψ называется угол между проекциями поперечной и главной режущих кромок на плоскость, перпендикулярную к оси сверла. Величина этого угла при правильной заточке сверла равна $50...55^\circ$.

Форма задней поверхности сверла. Задние поверхности сверла образуются заточкой в процессе изготовления или переточкой его после затупления. От точности выполнения этой операции зависят эксплуатационные характеристики сверла.

Технологически наиболее простой является *заточка сверла по плоскости* (рис. 3.4, а). Чтобы гарантировать задний угол между задней поверхностью и поверхностью резания в процессе сверления, следует обеспечивать угол заточки не менее $\alpha = 25...27^\circ$. Однако это создает опасность выкрашивания режу-

щих кромок. Данный метод используется при заточке сверл диаметром менее 3 мм. Для его применения на сверлах большего диаметра при углах $\alpha = 8 \dots 12^\circ$ необходимо удалять затылочную часть пера сверла.

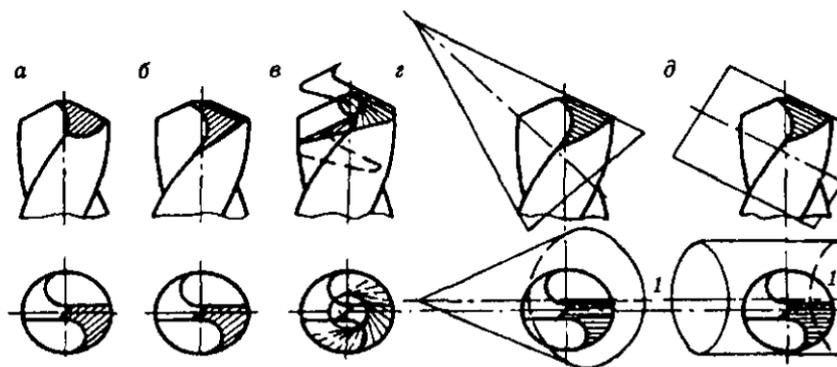


Рис. 3.4. Формы задней поверхности сверла

Чтобы на режущей части сверла получить независимые величины заднего угла на периферии, угла при вершине и угла наклона поперечной кромки, следует использовать *заточку сверла по двум плоскостям* (рис. 3.4, б). Поперечная кромка сверла при такой заточке состоит из двух наклонных прямых с выступающей центральной точкой, которая улучшает работу сверла в момент врезания в заготовку и повышает точность сверления. Задний угол для первой плоскости выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, а для второй — принимают в пределах $25 \dots 40^\circ$. Однако большой наклон второй плоскости уменьшает жесткость пера сверла, ослабляет режущий клин и ухудшает теплоотвод.

При *винтовой заточке* (рис. 3.4, в) сверло совершает три формообразующих движения: вращение вокруг своей оси, возвратно-поступательные движения затылования и осциллирования. Движения в данном случае так кинематически взаимосвязаны, что на один оборот сверла приходится по два цикла возвратно-поступательных движений. Таким образом, обеспечивается непрерывное деление и шлифование обоих перьев при каждом обороте сверла. Преимущества винтовой заточки — в универсальности ее приме-

нения для различных стержневых инструментов, а также легкой автоматизации. Поперечная кромка имеет выпуклую форму, что улучшает самоцентрирование сверла.

При конической (рис. 3.4, г) или цилиндрической (рис. 3.4, д) заточке сверло покачивается вокруг оси 1-1, скрещивающейся с осью сверла. Задний угол для этих видов заточки возрастает от периферии к центру сверла, причем наиболее интенсивно при заточке по конусу. Это создает более благоприятные условия резания на участках, прилегающих к поперечной кромке сверла.

Для улучшения режущих свойств и выравнивания нагрузки по длине режущих кромок используется *двойная заточка*, при которой сверло затачивается с углом при вершине $2\varphi = 116...140^\circ$, а на периферии сверла создается дополнительная режущая кромка длиной $B = 0,2D$ сверла с углом при вершине $2\varphi_0 = 70...90^\circ$.

Подточки сверл. Поперечную кромку сверла диаметром свыше 12 мм подтачивают главным образом для уменьшения ее длины до $(0,1...0,12)D$ или полного устранения, что значительно снижает осевую силу при сверлении, увеличивает период стойкости сверла и точность просверленного отверстия. Наиболее целесообразна подточка, при которой с уменьшением длины поперечной кромки изменяется передний угол. Поперечную кромку подтачивают на универсально-заточном станке с использованием специальных приспособлений. Существует несколько типов подточки поперечной кромки сверла (рис. 3.5).

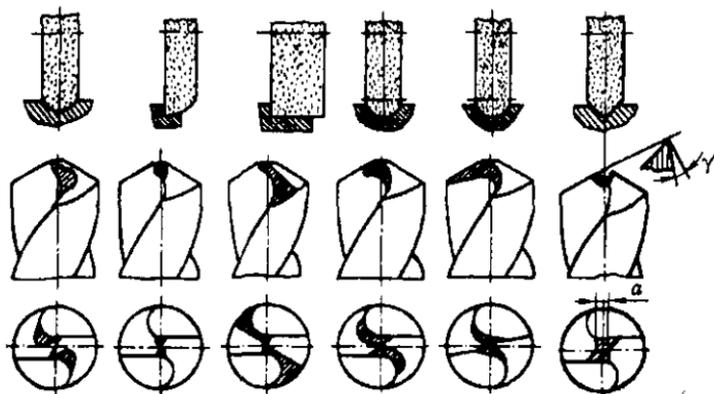


Рис. 3.5. Типы подточек поперечной кромки сверла

Наряду с подточкой поперечной кромки широко применяется *подточка ленточек*. Ленточки у сверл как вспомогательные режущие кромки режут обрабатываемый материал, а также направляют сверло по изготавливаемому отверстию. При этом задние углы на них равны 0° и излишняя ширина ленточки приводит к увеличению сил трения, температуры резания, а следовательно, к более интенсивному изнашиванию уголков сверла и самой ленточки. Подточка ленточек применяется при обработке вязких и труднообрабатываемых материалов.

3.1.3. Элементы режима резания и срезаемого слоя при сверлении

Так же как при точении, к элементам режима резания при сверлении относятся скорость главного движения, подача и глубина резания.

Скорость главного движения резания (скорость резания) v — это скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в направлении главного движения резания.

При сверлении, когда сверло или заготовка вращаются с частотой вращения n (об/мин), скорость резания v (м/мин) в разных точках режущей кромки будет разная. В расчетах принимается ее максимальное значение:

$$v = \frac{\pi D n}{1000},$$

где D — диаметр сверла, мм.

Подача S — перемещение режущей кромки относительно обработанной поверхности в направлении движения подачи (рис. 3.6). Сверло имеет два зуба (пера) и режет одновременно двумя режущими кромками, поэтому на каждую кромку (один зуб) приходится подача $S_z = S_0/z = S_0/2$ (мм).

Глубина резания t — размер слоя, удаляемого за один проход, измеренный в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности. Глубина резания при сверлении в сплош-

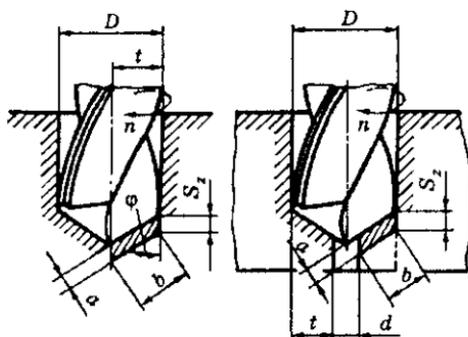


Рис. 3.6. Элементы режима резания и срезаемого слоя при сверлении и рассверливании

ном материале равна половине диаметра сверла, а при рассверливании отверстия от диаметра d до диаметра D

$$t = \frac{D - d}{2},$$

где D, d — соответственно конечный и начальный диаметры отверстия.

Ширина и толщина срезаемого слоя при сверлении (см. рис. 3.6), а также площадь поперечного сечения срезаемого слоя определяются аналогично токарной обработке (см. § 2.2), однако при расчетах учитывается подача на лезвие сверла, равная $S_0/2$.

3.1.4. Силы и мощность резания при сверлении

Предположим, что равнодействующая всех сил, возникающих на режущем лезвии сверла, т.е. на главной режущей кромке и ленточке, приложена в некоторой точке A (рис. 3.7). Разложим ее в трех взаимно перпендикулярных направлениях, как это было сделано для процесса точения, и получим три составляющие силы, действующие на каждое лезвие. Силы P_z создают крутящий момент $M_{кр}$, который преодолевается шпинделем станка. Силы P_y действуют по радиусам и взаимно уничтожаются. Силы P_x вместе с силой P_n , действующей на перемычке, образуют

осевую силу (или силу подачи) P_o , которая преодолевается механизмом подачи станка. В итоге на сверло действуют крутящий момент $M_{кр}$ и осевая сила, или сила подачи.

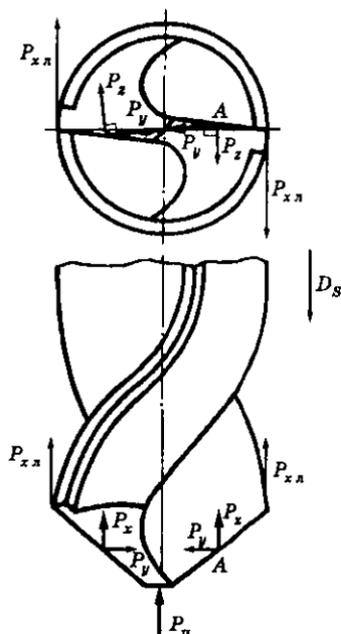


Рис. 3.7. Система сил, действующих на сверло

Эксперименты, проведенные с использованием динамометров при сверлении материалов сверлами разных диаметров и с различной подачей, позволили получить эмпирические формулы, которые используются для подсчета $M_{кр}$ и P_o :

$$M_{кр} = C_M S^{y_M} D^{x_M} K_M;$$

$$P_o = C_P S^{y_P} D^{x_P} K_P,$$

где C_M, C_P — коэффициенты, характеризующие условия сверления и свойства материала, принятого за эталон; K_M, K_P — общие поправочные коэффициенты на измененные условия работы (берутся из справочников).

Отметим в качестве примера, что при сверлении стали сверлом из быстрорежущей стали P9 $M_{кр} = 0,345D^2S^{0.3}$ Н·м, при сверлении чугуна $P_o = 570DS^{0.8}$ Н.

Резание при сверлении осуществляется пятью элементами сверла: двумя главными режущими кромками, перемычкой и двумя кромками направляющих ленточек. На каждый из этих элементов приходится определенная доля $M_{кр}$ и осевой силы P_o . Специальные исследования показывают, что между этими составляющими существуют примерно следующие соотношения:

1) по $M_{кр}$: на главные режущие кромки приходится 80 %, на перемычку — 8, на трение ленточек об обработанную поверхность и трение стружки о канавки сверла — 12 % общего $M_{кр}$;

2) по P_o : на режущие кромки — 40 %, на перемычку — 57, на трение ленточек об обработанную поверхность и стружки о канавки сверла — 3 % от общей силы P_o .

Геометрические параметры сверла оказывают существенное влияние на $M_{кр}$ и P_o . Так, с возрастанием угла наклона винтовой канавки ω (рис. 3.8, а) увеличивается передний угол γ , а значит, облегчается процесс стружкообразования и уменьшаются $M_{кр}$ и P_o . Такое снижение $M_{кр}$ и P_o особенно заметно при увеличении ω до 30°. Дальнейшее изменение ω не оказывает существенного влияния на $M_{кр}$ и P_o .

В зависимости от угла 2ϕ уровни $M_{кр}$ и P_o изменяются, так как изменяются ширина и толщина среза (аналогично точению). С увеличением 2ϕ значение $M_{кр}$ уменьшается, а P_o возрастает (рис. 3.8, б).

Длина k поперечной кромки оказывает большее влияние на P_o , чем на $M_{кр}$ (рис. 3.8, в). Для уменьшения P_o делают специальные подточки перемычки.

Влияние свойств обрабатываемого материала на практике учитывается, как и для точения, эмпирическими зависимостями:

$$M_{кр} = C'_1 HB^{q_M}, \text{ или } M_{кр} = C''_1 \sigma_B^{q_M};$$

$$P_o = C'_2 HB^{q_P}, \text{ или } P_o = C''_2 \sigma_B^{q_P}.$$

Значения постоянных коэффициентов и показателей степеней приводятся в соответствующих справочниках и нормативах режимов резания.

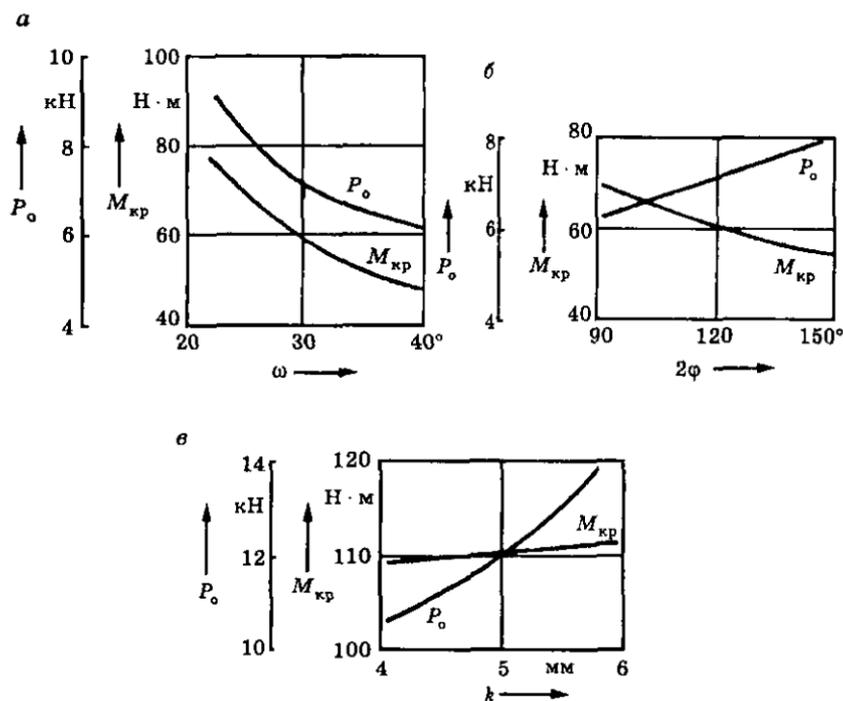


Рис. 3.8. Зависимость P_o и $M_{кр}$ при сверлении от угла наклона винтовой канавки ω (а), угла при вершине 2ϕ (б) и длины поперечной кромки k (в)

Зная крутящий момент и осевую силу, можно определить мощность, требуемую на процесс сверления:

$$N_p = N_{кр} + N_S = \frac{M_{кр}n}{9750} + \frac{P_o S n}{60 \cdot 10^6},$$

где $N_{кр}$, N_S — мощность, требуемая соответственно на вращение сверла и подачу.

Так как $N_S = (0,5 \dots 1,5) \%$ от $N_{кр}$, можно записать: $N_p = M_{кр}n/9750$. С учетом КПД станка $\eta_{ст}$ мощность электродвигателя $N_{дв} = N_p/\eta_{ст}$.

3.1.5. Износ и стойкость сверл

В общем случае сверла из быстрорежущей стали изнашиваются по задним (h_z) и передним (h_n) поверхностям, уголкам (h_y), ленточкам (h_l) и поперечной кромке $h_{п.к}$ (рис. 3.9).

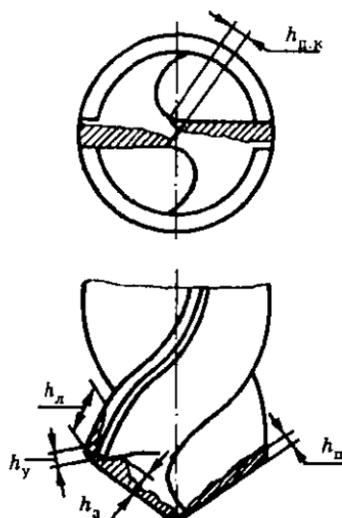


Рис. 3.9. Характер износа сверла

Влияние режимов обработки на стойкость сверл в целом аналогично описанному для процесса точения (см. § 2.6). Общий вид зависимости может быть описан следующим выражением:

$$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m S^{y_v}} K_v.$$

В приведенной формуле коэффициент K_v учитывает измененные условия работы сверла. Значения величин C_v , q_v , y_v для каждого конкретного случая обработки различны и приводятся в справочно-нормативной литературе.

3.2. Зенкерование

3.2.1. Назначение, конструктивные элементы и геометрические параметры зенкеров

Зенкеры — это многозубые режущие инструменты для повышения точности, формы и направления оси цилиндрических отверстий, полученных после сверления, отливки или штамповки; для обработки цилиндрических и конических отверстий под головки винтов и торцовых поверхностей бобышек, выступов; для окончательной обработки цилиндрических отверстий по квалитетам точности 10–12 и обеспечения шероховатости поверхности $Rz = 20 \dots 40$ мкм; для обработки отверстий под последующее развертывание. В отличие от сверла зенкер имеет большее количество режущих кромок (обычно три–четыре) и не имеет поперечной режущей кромки. Под зенкерование назначается припуск 1...4 мм на диаметр.

Элементы конструкции хвостового зенкера для обработки цилиндрических отверстий показаны на рис. 3.10, а. Рабочая часть зенкера состоит из режущей и калибрующей (направляющей) частей. Длина режущей части определяется глубиной резания и главным углом в плане ϕ .

Калибрующая часть обеспечивает получение требуемого размера отверстия, направление зенкера в процессе обработки и служит запасом на переточки режущей части. Длину калибрующей части принимают в зависимости от диаметра и глубины отверстия. На калибрующей части вдоль режущей кромки шлифуются ленточки шириной $f = 0,8 \dots 2,5$ мм в зависимости от диаметра зенкера D . Высота ленточки 0,2...1,0 мм. Диаметр зенкера для обработки отверстий устанавливается в зависимости от его назначения. Диаметр зенкера № 1 для обработки отверстий под последующее развертывание определяется с учетом припуска под развертывание. Диаметр зенкера № 2 для окончательной обработки определяется диаметром обрабатываемого отверстия с уче-

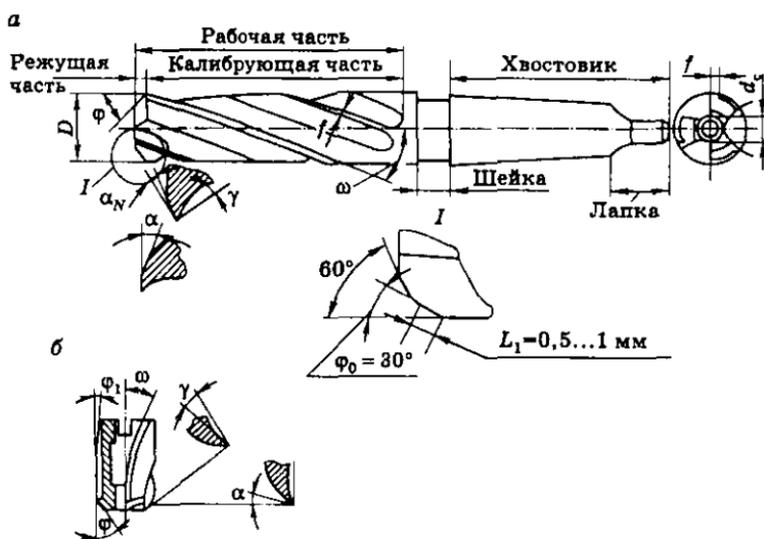


Рис. 3.10. Конструктивные элементы и геометрические параметры хвостового (а) и насадного (б) зенкеров

том допуска на отверстие, разбивки и запаса на изнашивание. Ориентировочно величина разбивки принимается равной $0,3...0,4$ допуска на обрабатываемое отверстие. Допуск на изнашивание равен $0,25$ допуска на отверстие.

Диаметр сердцевины d_c у цельных зенкеров составляет $0,5$ диаметра инструмента. Для повышения прочности и жесткости зенкера диаметр сердцевины к хвостовику может увеличиваться на $1...2$ мм.

Хвостовые цельные зенкеры имеют три зуба, насадные цельные (рис. 3.10, б) — четыре. Профиль и размеры канавок выбирают исходя из конструкции и числа зубьев зенкера. Параметры профиля определяются в зависимости от диаметра зенкера.

Режущая часть зенкера снабжена главными режущими кромками с углом в плане $\varphi = 60^\circ$ (см. рис. 3.10, а). Для обработки стальных деталей рекомендуется затачивать переходную кромку шириной $0,5...1,0$ мм под углом $\varphi_0 = \varphi/2 = 30^\circ$. Это упрочняет режущую часть, повышает массивность периферийных участ-

ков режущей кромки и способствует повышению стойкости инструмента.

Передний угол γ зенкеров измеряется в главной секущей плоскости и назначается в зависимости от свойств обрабатываемого материала и материала режущей части зенкера. Величина этого угла составляет обычно $0...15^\circ$.

Задний угол α измеряется так же, как и для сверла, в плоскости, параллельной подаче, и принимается равным $6...10^\circ$.

Угол наклона главной режущей кромки λ в зависимости от направления схода стружки принимается в пределах $-10...+15^\circ$. При положительном значении угла λ стружка отводится в сторону хвостовика, при отрицательном — по направлению подачи. Зенкеры с отрицательным углом λ применяются при обработке сквозных отверстий. Для зенкеров универсального назначения угол $\lambda = 0^\circ$.

Стружечные канавки у зенкеров делают винтовыми, косыми и прямыми. Наиболее часто применяют винтовые канавки. Косые канавки применяют у зенкеров со вставными ножами. У хвостовых зенкеров угол наклона канавки $\omega = 15...25^\circ$, у насадных $\omega = 15...20^\circ$. Большие значения угла ω принимают при обработке заготовок из более вязких материалов. Зависимость между углами ω и γ подобна приведенной для спирального сверла.

Для облегчения процесса резания, уменьшения трения и изнашивания калибрующая часть зенкера изготавливается с обратной конусностью к хвостовику в пределах $0,04...0,1$ мм на 100 мм длины, что обеспечивает образование вспомогательного угла в плане ϕ_1 (см. рис. 3.10).

3.2.2. Элементы режима резания и срезаемого слоя при зенкеровании

Элементы режима резания и срезаемого слоя при зенкеровании представлены на рис. 3.11. Величины этих параметров в целом аналогичны описанным в п. 3.1.3 для процесса рассверливания, однако подача на зуб зенкера определяется как $S_z = S_0/z$.

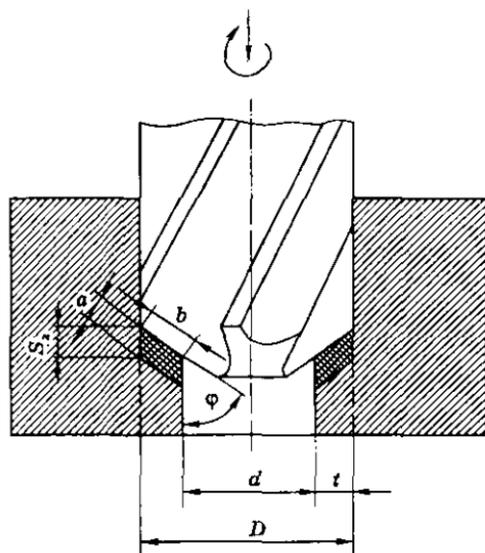


Рис. 3.11. Элементы режима резания и срезаемого слоя при зенкеровании

Соответственно, толщина a и ширина b среза, снимаемые каждой режущей кромкой зенкера, равны

$$a = S_0 \sin \varphi = \frac{S_0}{z} \sin \varphi, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi}.$$

3.2.3. Силы и мощность резания при зенкеровании

Одним из наиболее важных параметров процесса зенкерования является необходимый крутящий момент, определяемый по эмпирической формуле

$$M_{кр} = C_M t^{x_M} S_0^{y_M} D z K_{1M}, \dots, K_{iM},$$

где C_M , x_M и y_M — коэффициент и показатели степени, характеризующие общие условия зенкерования и свойства обрабатываемого материала; t — срезаемый припуск; D — диаметр зенкера; z — число зубьев; K_{1M}, \dots, K_{iM} — поправочные коэффициенты, учитывающие условия зенкерования.

Значения C_M , x_M , y_M и поправочных коэффициентов приводятся в справочной литературе. Влияние углов в плане ϕ и ω аналогично описанному для сверления.

Мощность зенкерования рассчитывается по формуле, аналогичной процессу сверления.

3.2.4. Износ и стойкость зенкеров

Износ зенкеров возникает одновременно на передней, задней поверхностях и ленточках (рис. 3.12). Лимитирующим износом зенкера, определяющим наибольшее допустимое количество переточек, является износ по ленточке. Величина допустимого износа зависит от размеров зенкера и свойств обрабатываемого материала. В соответствии с принятыми величинами износа устанавливаются рациональные периоды стойкости зенкеров.

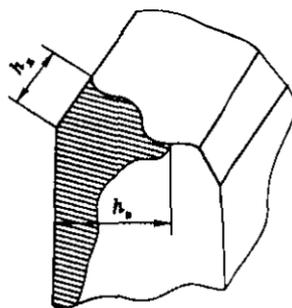


Рис. 3.12. Характер износа зенкера

Влияние режимов обработки на стойкость зенкеров описывается зависимостью

$$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^{m_t} x_v S^{y_v}} K_v.$$

В приведенной формуле коэффициент K_v учитывает измененные условия работы зенкера. Значения величин C_v , q_v , x_v , y_v для каждого конкретного случая обработки различны и приводятся в справочно-нормативной литературе.

3.3. Развертывание

3.3.1. Назначение, конструктивные элементы и геометрические параметры разверток

Развертка — это осевой режущий инструмент для повышения точности формы и размеров отверстия и снижения шероховатости обработанной поверхности; для предварительной и окончательной обработки отверстий по qualitетам точности 6–10 с шероховатостью поверхности $Ra = 2,5 \dots 0,32$ мкм (средняя величина припуска под развертывание в этом случае составляет соответственно 0,25...0,5 мм и 0,05...0,15 мм на диаметр).

Развертка в отличие от сверла и зенкера только исправляет форму отверстия, но, как правило, не может исправить направление его оси, так как снимает небольшой слой металла.

Развертка (рис. 3.13) имеет большее число зубьев — 6–14, расположенных обычно параллельно оси инструмента. Число зубьев рекомендуется принимать четным, чтобы облегчить измерение диаметра микрометром.

Окружной шаг зубьев делают равномерным или неравномерным. Применение разверток с неравномерным шагом снижает шероховатость обработанной поверхности отверстия и уменьшает его огранку. Для удобства измерения диаметра развертки с неравномерным окружным шагом накрест лежащие углы делают равными, так чтобы режущие кромки противоположных зубьев находились в одной осевой плоскости.

У разверток, предназначенных для обработки сквозных отверстий с продольными канавками или прерывающихся по длине, делают винтовые зубья. Направление винтовых зубьев обратно направлению резания для предотвращения самозатягивания и заедания развертки. Угол наклона зубьев зависит от обрабатываемого материала.

По способу применения развертки делятся на *ручные* для обработки отверстий вручную (рис. 3.13, а) и *машинные*, используемые на различных станках (рис. 3.13, б). Машинные развертки бывают хвостовыми и насадными, ручные развертки — только хвостовыми.

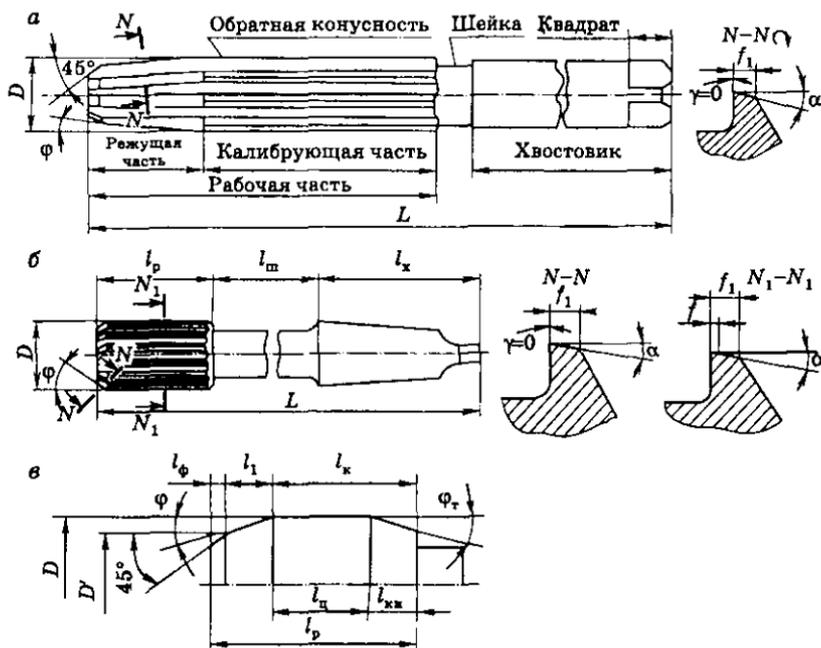


Рис. 3.13. Конструктивные элементы и геометрия хвостовых разверток: а — ручной; б — машинной; в — рабочей части; D — наружный диаметр развертки; l_p — длина рабочей части; $l_{ш}$ — длина шейки; l_x — длина хвостовика; l_ϕ — длина заборной фаски; l_1 — длина режущей части; l_k — длина калибрующей части; $l_{ц}$, $l_{км}$ — длина соответственно цилиндрического и конического участка калибрующей части

Хвостовые развертки имеют рабочую часть, состоящую из режущей и калибрующей частей, шейку и хвостовик. Конструктивное оформление хвостовой части машинной развертки аналогично зенкерам. У ручных разверток на конце цилиндрического хвостовика имеется квадрат.

Зубья, расположенные на режущей части, затачивают доостра, на калибрующей — по задней поверхности вдоль режущей кромки оставляют цилиндрическую ленточку (N_1-N_1) шириной $f = 0,05 \dots 0,3$ мм (в зависимости от диаметра развертки) для лучшего направления при работе и сохранения диаметра развертки. Длина режущей части зависит от главного угла в плане и глубины резания. Длина рабочей части у ручных разверток составляет $4 \dots 10$, у машинных — $0,75 \dots 2,0$ диаметра развертки.

Калибрующую часть у развертки на длине $0,4 \dots 0,5$ длины рабочей части делают цилиндрической, далее для уменьшения разбивки отверстия калибрующая часть может иметь обратную конусность. У ручных разверток обратная конусность равна $0,010 \dots 0,015$ мм на 100 мм длины, у машинных — $0,04 \dots 0,10$ мм.

Угол в плане φ развертки (см. рис. 3.13) определяется ее назначением. От его величины зависит распределение составляющих силы резания. Чем меньше угол φ , тем меньше осевая сила и легче проникновение развертки в обрабатываемое отверстие. В то же время стружка становится более тонкой, а при обработке вязких материалов она хуже отделяется. Поэтому для ручных разверток для лучшего направления в начале работы угол φ находится в пределах $1 \dots 2^\circ$, для машинных — $5 \dots 45^\circ$, исходя из требований обеспечения наилучших условий резания и типа отверстия. Для глухих отверстий угол φ больше, чтобы получить короткую режущую часть. При обработке заготовок из серого чугуна угол $\varphi = 5^\circ$, из стали — угол $\varphi = 15^\circ$. У разверток, имеющих угол $\varphi < 45^\circ$ в начале режущей части, для облегчения захода развертки в отверстие делают направляющий конус под углом 45° и длиной $1,5 \dots 3,0$ мм.

Диаметр развертки в начале режущей части делают меньше предварительно обработанного отверстия на $0,3 \dots 0,4$ припуска под развертывание. Это необходимо, чтобы обеспечить свободный вход развертки в отверстие и улучшить ее первоначальное направление. Место перехода режущей части в калибрующую должно быть закруглено.

Углы γ и α измеряются в главной секущей плоскости $N-N$ и выбираются в зависимости от назначения развертки и обрабатываемого материала. У черновых разверток $\gamma = 5 \dots 10^\circ$ для вязких материалов и $\gamma = 0^\circ$ — для хрупких. У чистовых разверток $\gamma = 0^\circ$, так как зуб развертки срезает слой материала малой толщины и стружка почти не касается передней поверхности, а при малом значении угла γ режущая кромка упрочняется. У твердосплавных разверток обычно $\gamma = 0^\circ$, а при обработке деталей из материалов высокой твердости γ может быть и отрицательным. На калибрующей части развертки углы измеряются в плоскости N_1-N_1 , перпендикулярной оси развертки. Передние углы на

режущей и калибрующей части в связи с малыми значениями угла φ можно принять одинаковыми ($\gamma = \gamma_1$). Рекомендуемое значение угла $\alpha = 6...8^\circ$. На ленточке, прошлифованной по цилиндру, $\alpha_1 = 0$.

3.3.2. Элементы режима резания и срезаемого слоя при развертывании

Элементы режима резания и срезаемого слоя при развертывании представлены на рис. 3.14. Определения и зависимости для расчета этих параметров в целом такие же, как и для процесса зенкерования.

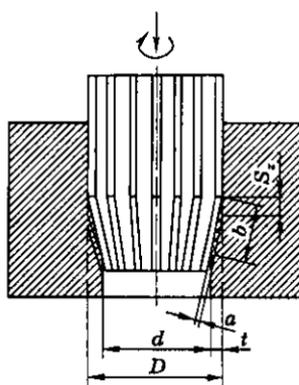


Рис. 3.14. Элементы режима резания и срезаемого слоя при развертывании

3.3.3. Износ и стойкость разверток

Износ разверток оказывает большое влияние на точность и шероховатость обработанного отверстия. Чаще всего изнашивание происходит по уголку зуба в месте перехода главной режущей кромки во вспомогательную (рис. 3.15). Величина допустимого износа разверток определяется уменьшением точности размеров

(разбивание отверстия превышает пределы поля допуска на отверстие). Величина допустимого износа по задней поверхности зуба у вершины составляет для разверток из быстрорежущей стали 0,6...0,8 мм; для разверток, оснащенных твердым сплавом, при обработке незакаленных сталей и чугуна — 0,4...0,7 мм; при обработке закаленной стали — 0,3...0,35 мм. При развертывании отверстий в нержавеющей, жаропрочных сталях и титановых сплавах величина допустимого износа составляет 0,2...0,3 мм.



Рис. 3.15. Характер износа развертки

Если на ленточках нет следов изнашивания, то режущую способность развертки восстанавливают заточкой задних поверхностей по заборному конусу. Наличие выкрашиваний или затушения кромок калибрующей части развертки резко снижает ее стойкость и требует увеличения длины стачивания или перешлифовки на новый номинальный диаметр.

Зависимости для расчета скорости развертывания аналогичны известным для зенкерования (см. п. 3.2.4). Однако обычно скорость развертывания в справочниках дается как постоянная величина. При развертывании резание осуществляется с весьма малыми толщинами среза. Как следствие, имеет место значительное упрочнение поверхностного слоя отверстия и возрастание температуры, приводящее к интенсивному наростообразованию, ухудшению шероховатости обработанной поверхности, потере точности отверстия. Чтобы этого избежать, развертывание обычно осуществляют на низких скоростях резания. Так, для черновой обработки сталей быстрорежущими развертками скорость резания не превышает 10 м/мин, а для чистовой — 2...4 м/мин.

3.4. Конструкции и расчет сверл, зенкеров и разверток

3.4.1. Конструкции и расчет сверл

Быстрорежущие спиральные сверла универсального назначения стандартизованы с учетом областей применения — обработка черных металлов, жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, алюминиевых сплавов, пластмасс и т.д.

Спиральные сверла изготавливают из быстрорежущих сталей или твердых сплавов (цельные). Наиболее широко используются марки быстрорежущих сталей Р6М5, Р6М5А, Р6М5К5. Твердость рабочей части сверл из быстрорежущих сталей должна быть: 58...61 HRC (для $d < 0,7$ мм), 59...62 HRC (для $d = 0,7...1$ мм), 61...63 HRC (для $d = 1...5$ мм) и 61...64 HRC (для $d > 5$ мм). При изготовлении сверл из кобальтовых и ванадиевых быстрорежущих сталей твердость должна быть на 1...2 HRC выше. Твердость измеряется на длине, равной длине винтовой канавки, уменьшенной на $1,5d$ (у цельных сверл) или на длине, равной $2/3$ длины винтовой канавки (у сварных сверл).

Присоединительная часть (хвостовик) для сверл диаметром свыше 8 мм изготавливается из сталей 45 или 40Х и приваривается к рабочей части. Твердость хвостовика — 40...50 HRC, лапок — 32...47, а поводков сверл с цилиндрическим хвостовиком — не менее 27 HRC.

Материал корпуса сверл с цельной твердосплавной рабочей частью и сверл с впаянными твердосплавными пластинами — стали марок Р6М5, Р9, 9ХС, 40Х или 45Х. Твердость корпуса из сталей 40Х и 45Х должна быть 40...50 HRC, из стали 9ХС и Р9 — 55...61 HRC. Твердость корпусов (на участке, равном длине пластины) за пластиной может быть на 10 HRC меньше.

В большинстве конструкций сверл используются две направляющие ленточки. Но при сверлении труднообрабатываемых материалов для увеличения жесткости сверл применяются четыре ленточки, которые располагаются со стороны режущих канавок и тыльной части спинки сверла.

Ширина ленточки сверла при обработке легких сплавов принимается равной

$$f = 1,2 + 0,2682 \ln \left[d - 18 + \sqrt{(d - 18)^2 + 1} \right],$$

а при обработке других материалов — $f = 0,5\sqrt[3]{d}$. Высота ленточки обычно составляет $(0,025 \dots 0,05)d$; тогда диаметр спинки $q = (0,9 \dots 0,95)d$. Следует стремиться максимально увеличить диаметр спинки, поскольку даже небольшое увеличение способствует значительному возрастанию момента инерции сечения сверла и его прочности.

Центральный угол канавки сверла ν равен 116° при обработке легких сплавов и $90 \dots 93^\circ$ — других материалов. Ширину пера B обычно принимают равной

$$B = d \sin \left(\frac{\pi - \nu}{2} \right) \cos \omega,$$

где ω — угол наклона винтовой канавки.

Толщина сердцевины сверла k равна $(0,18 \dots 0,15)d$ для $d = 1,5 \dots 12$ мм и $(0,15 \dots 0,13)d$ для $d = 13 \dots 80$ мм.

Для труднообрабатываемых материалов $k = (0,4 \dots 0,5)d$. Для повышения прочности и жесткости сверла его сердцевина обычно утолщается к хвостовику на $1,4 \dots 1,8$ мм на каждые 100 мм длины.

Длина сверла в общем случае равна

$$L = L_o + (0,3 \dots 1)d + L_{\text{кон}} + L_{\text{ст}} + L_{\text{к}} + L_{\text{ш}} + L_{\text{хв}},$$

где L_o — длина отверстия с учетом врезания и перебега; $(0,3 \dots 1)d$ — запас для выхода стружки из отверстия; $L_{\text{кон}}$ — длина кондукторной втулки; $L_{\text{ст}}$ — длина стачивания (принимается по справочникам норм расхода режущих инструментов); $L_{\text{к}} = 0,5d$ — длина стружечной канавки неполной глубины; $L_{\text{ш}} = 8 \dots 12$ мм — длина шейки; $L_{\text{хв}}$ — длина хвостовика.

Форма хвостовика сверла определяется его диаметром. Если диаметр конечной ступени не превышает 6 мм, используют цилиндрический хвостовик. Конические хвостовики следует выполнять в виде конусов Морзе с лапками, которые необходимы для съема инструмента со станка и не должны нагружаться во время работы. Размеры конусов и лапок стандартизованы ГОСТ 25557-82.

Диаметр конуса Морзе определяется крутящим моментом, который хвостовик должен передать при сверлении с учетом затупления инструмента. Для определения среднего диаметра конуса используется выражение

$$d = 0,5933M_{кр}/P_o,$$

где $M_{кр}$, P_o — крутящий момент и осевая сила при сверлении, определяемые с помощью справочников.

Для повышения скорости резания при изготовлении сверл используют твердые сплавы. **Монолитные твердосплавные сверла** и **сверла с твердосплавной рабочей частью** по конструктивным параметрам похожи на спиральные быстрорежущие сверла. Однако все твердосплавные сверла имеют по сравнению с быстрорежущими сверлами ряд особенностей:

- 1) уменьшена на 30...40 % длина рабочей части l_p ;
- 2) увеличен диаметр сердцевины d_c до $0,3D$ (у быстрорежущих сверл обычно $d_c = 0,2D$);
- 3) уменьшен угол наклона винтовых канавок ω у сверл с напаянными пластинами: на пластине он равен 6° , а на корпусе $15...20^\circ$ (рис. 3.16, а);

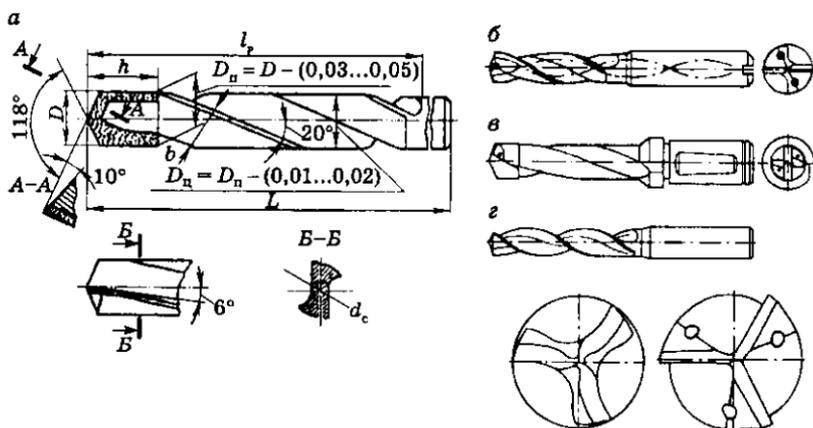


Рис. 3.16. Сверла с твердосплавной рабочей частью:

а — с напаянной пластиной; б, в — монолитные; г — монолитные с тремя стружечными канавками; D_n — минимальный диаметр твердосплавной пластины; D_c — диаметр цилиндрической части корпуса

4) увеличена обратная конусность на корпусе до 0,15 мм на 100 мм длины и на пластине — 0,5 мм на 100 мм длины (для сверл из быстрорежущей стали обратная конусность несколько ниже).

Для сверления отверстий в печатных платах на станках с ЧПУ разработаны сверла повышенной жесткости и виброустойчивости. Достигается это увеличением диаметра хвостовика до 3 мм с выполнением двух переходных конусов с углами 18° и 60° . Сверла имеют коническое утолщение сердцевинки от вершины сверла к хвостовику на 0,1...0,15 мм на каждые 10 мм длины. Для лучшего размещения стружки увеличена ширина стружечной канавки, ширина пера $B = (0,45...0,5)D$. Угол наклона спиральных канавок 28° , угол при вершине 125° . Заточка сверл двухплоскостная. Главный задний угол равен 15° , вспомогательный — 30° .

Сверла с цельной твердосплавной рабочей частью (рис. 3.16, б, в) имеют увеличенную толщину сердцевинки $d_c = (0,33...0,4)D$ и ширину пера $B = (0,6...0,7)D$. Угол наклона спиральных канавок равен $30...40^\circ$. Предусмотрены подточки перемычки сверла и каналы для подвода СОЖ под давлением в зону резания.

В последнее время получили распространение трехперые монолитные спиральные сверла из твердого сплава (рис. 3.16, г). Они имеют значительно большую жесткость, чем сверла традиционных конструкций, и обеспечивают хорошее врезание сверла в заготовку благодаря ликвидации поперечной режущей кромки. Наличие внутри перьев сверла каналов для подвода СОЖ существенно улучшает условия резания. Такие сверла используются для обработки отверстий со скоростями резания свыше 100 м/мин.

Все большее распространение получают сверла диаметром свыше 12 мм с многогранными неперетачиваемыми твердосплавными пластинами (рис. 3.17). Конструкция сверла пред-

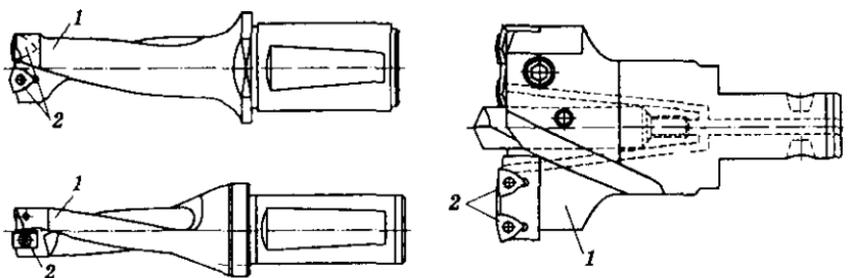


Рис. 3.17. Сверла с неперетачиваемыми твердосплавными пластинами

ставляет собой корпус 1 с двумя прямыми или винтовыми стружечными канавками, на переднем торце которого закреплены твердосплавные пластины 2 различной формы. Одна из пластин располагается у оси сверла, вторая — на периферии. Сверла диаметром 20...60 мм оснащаются двумя неперетачиваемыми твердосплавными пластинами, а большего диаметра — четырьмя, устанавливаемыми непосредственно в корпусе сверла или в сменных кассетах. Для подачи СОЖ в зону резания в корпусе сверла предусмотрены специальные отверстия.

Снимаемый припуск делится по ширине между взаимно перекрывающимися пластинами, которые располагаются в корпусе таким образом, что радиальная нагрузка с обеих сторон от оси сверла сбалансирована и отпадает необходимость в предварительно засверленном отверстии или кондукторной втулке в момент засверливания. Обладая высокой жесткостью и надежной системой подачи СОЖ в зону резания, эти сверла позволяют вести обработку с повышенными подачами и скоростями по сравнению со спиральными сверлами из быстрорежущей стали.

Для изготовления центровых отверстий применяются *центровочные сверла* (рис. 3.18) трех типов: простые, комбинированные, комбинированные с предохранительным конусом. *Простые сверла* по конструкции не отличаются от спиральных. *Комбинированные сверла* изготавливаются двухсторонними для лучшего использования материала. Канавки делаются или прямыми, или наклонными с углом наклона $\omega = 5...8^\circ$. Угол при вершине режущей части $\varphi = 50...60^\circ$, угол наклона поперечной

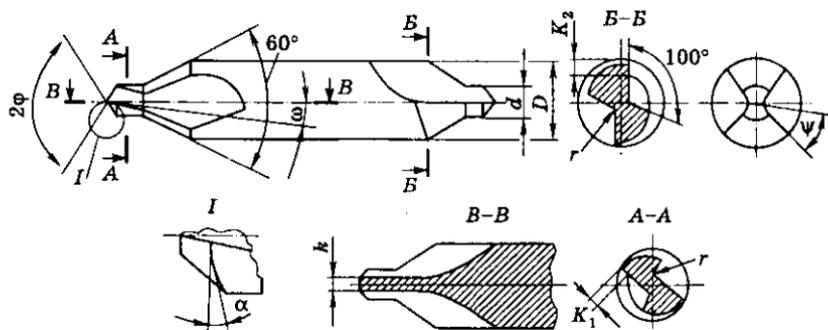


Рис. 3.18. Центровочное сверло

кромки $\psi = 50 \dots 55^\circ$. Толщина сердцевины $k = (0,25 \dots 0,17)D$ и увеличивается по направлению к хвостовику под углом 3° . Передний угол $\gamma = 5 \dots 6^\circ$. Заточка комбинированного сверла производится так же, как и спирального. Задний угол α на периферии режущей части равен 8° .

Перовые сверла применяются при обработке твердых материалов, а также ступенчатых и фасонных отверстий. Они могут быть *цельными, сварными и составными*. Рабочая часть перового сверла может быть получена ковкой или фрезерованием круглого или квадратного стержня. В составных перовых сверлах она выполняется в виде пластины и вставляется в паз державки.

Перовые сверла имеют ряд недостатков:

- большие отрицательные передние углы (рис. 3.19, а);
- плохое направление в отверстии, затруднительные условия отвода стружки;

- допускают малое число переточек.

Для получения положительных передних углов и улучшения процесса резания передняя поверхность таких сверл снабжается лункой (рис. 3.19, б, в), но это приводит к снижению прочности режущей части. Для облегчения процесса резания у сверл больших диаметров на режущих кромках делают стружкораздели-

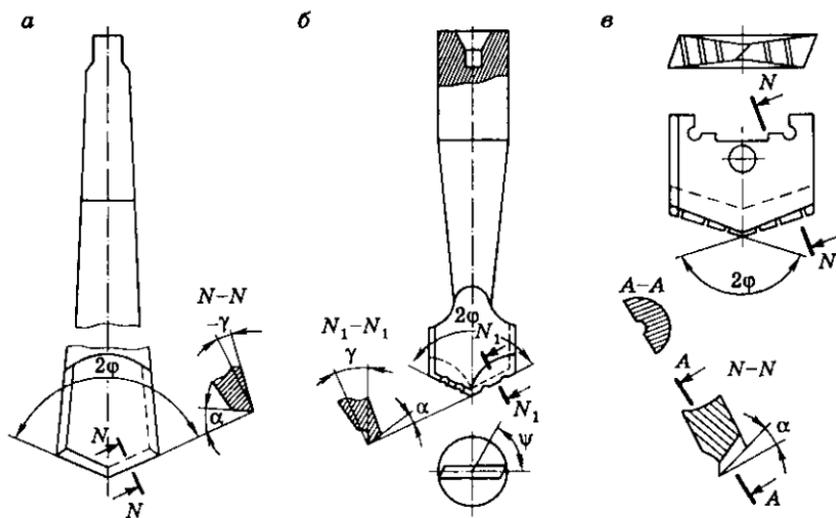


Рис. 3.19. Перовые сверла

тельные канавки шириной 2...3 мм, которые должны располагаться несимметрично относительно оси сверла. Расстояние между канавками 8...12 мм.

Отверстия, глубина которых превышает диаметр в 5 раз и более, принято называть глубокими. Обработка таких отверстий производится *сверлами для сплошного* ($D \leq 80$ мм) и *кольцевого* ($D > 80$ мм) *сверления*. При сверлении глубоких отверстий значительно ухудшается подвод охлаждающей жидкости к режущим кромкам, затрудняется отвод теплоты и стружки из зоны резания, уменьшается жесткость инструмента, поэтому такие сверла имеют ряд особенностей.

При сверлении глубоких отверстий небольших диаметров (3...30 мм) и невысокой точности хорошо зарекомендовали себя *шнековые сверла* (рис. 3.20). Они отличаются увеличенным диаметром сердцевины по всей длине (до 0,5 диаметра сверла) и углом $\omega = 45... 60^\circ$. Стружечные канавки шнековых сверл имеют в осевом сечении треугольный профиль с закруглением во впадине. В конструкции сверл выделяют режущую и транспортирующую части. Первая часть отделяет и формирует стружку, вторая — отводит ее из зоны резания. Режущая часть сверла

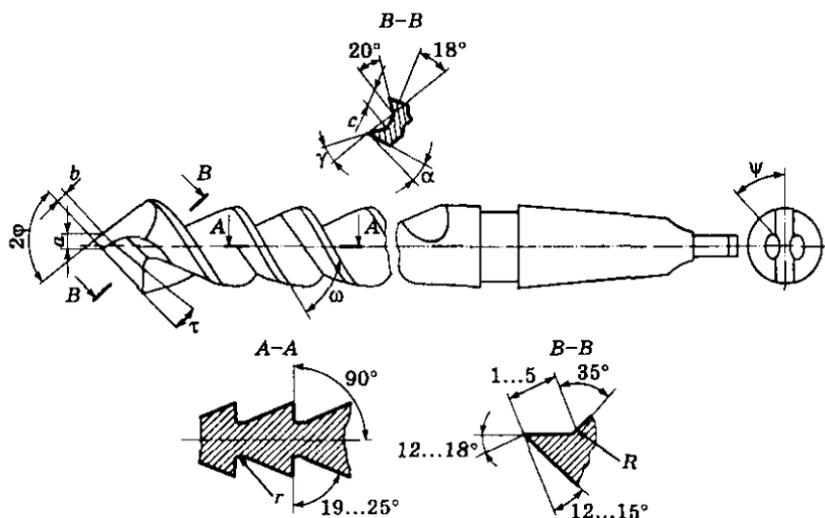


Рис. 3.20. Шнековое сверло

имеет специальную заточку, задние поверхности затачиваются по плоскости. Для дробления стружки на передней поверхности затачивается порожек трапецевидной формы. Это позволяет получать оптимальные геометрические параметры исходя из физико-механических свойств обрабатываемого материала и условий обработки независимо от угла наклона винтовой канавки ω .

Значения угла 2φ назначают в зависимости от свойств обрабатываемого материала в пределах $90...130^\circ$. Задние углы выбирают в пределах $12...15^\circ$, передние — $12...18^\circ$, угол $\tau = 5...7^\circ$.

Созданное в Белорусском политехническом институте (ныне Белорусский национальный технический университет) сверло БПИ (рис. 3.21) для обработки отверстий диаметром $3...30$ мм на глубину до $30-35$ диаметров отличается специальным профилем стружечных канавок и наличием двух ленточек на каждом пере. Стружечные канавки выполнены под углом $\omega = 53...55^\circ$, диаметр сердцевины равен $0,5D$. Подвод охлаждающей жидкости к режущим лезвиям осуществляется по каналам, выполненным в спинке сверла. Для эффективного охлаждения режущей части достаточно подавать СОЖ с расходом не более $2...3$ л/мин под давлением $0,05$ МПа. Надежное дробление стружки обеспе-

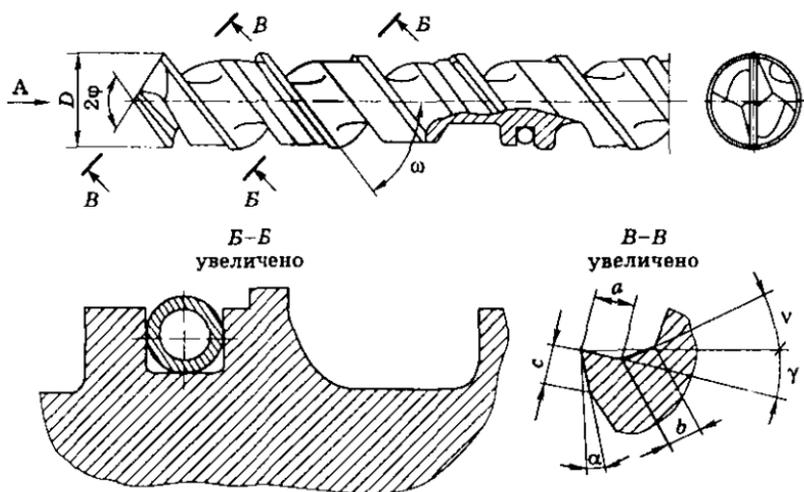


Рис. 3.21. Сверло БПИ

(a, b, c, v — параметры стружкодробящей канавки)

Сверло имеет одну режущую кромку, состоящую из двух частей — наружной и внутренней. Вершина сверла для лучшего направления при работе смещена относительно оси на некоторую величину, равную примерно $0,2D$. В процессе работы сверла на детали образуется конус, обеспечивающий сверлу дополнительное направление. На различных отрезках режущей кромки имеют место различия в действующих на них радиальных силах. В результате сверло прижимается направляющей частью к обработанной поверхности отверстия. Это предохраняет сверло от увода, отверстие — от разбивки, а также повышает период стойкости сверла. Для уменьшения трения при работе калибрующая часть имеет обратную конусность в пределах $0,1 \dots 0,3$ мм на длине 100 мм. Вдоль вспомогательной режущей кромки на калибрующей части оставляется ленточка шириной $0,2 \dots 0,6$ мм.

Эжекторные сверла (рис. 3.23) изготавливаются диаметром $20 \dots 65$ мм. Их особенностью является эффект подсоса СОЖ, уходящей вместе со стружкой в результате разрежения и перепада давлений, создаваемых внутри корпуса сверла. Прямой поток жидкости подается под давлением $2 \dots 3$ МПа по каналу *А* между внутренним и наружным стеблями. Не доходя до рабочей части, он разделяется. Примерно 70 % жидкости направляется в зону резания через выполненные в корпусе сверла отверстия, а 30 % жидкости отводится обратно через щелевые сопла *Б*, сделанные на внутреннем стебле. Между потоком жидкости, которая отводится вместе со стружкой из рабочей зоны, и потоком, уходящим через сопла *Б* по стеблю *1*, создается разрежение и перепад

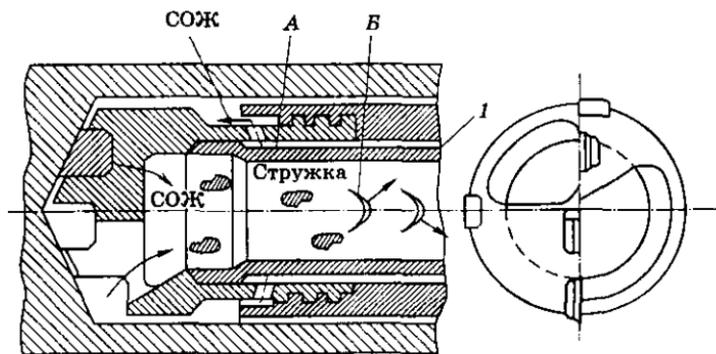


Рис. 3.23. Схема работы эжекторного сверла

давлений. В результате основной поток жидкости со стружкой, отходящий из зоны резания, как бы засасывается жидкостью, уходящей через сопла *Б*, и движется с большей скоростью. Сверла обеспечивают точность обработки отверстий по квалитетам 9–11 и шероховатость поверхности $Ra = 2,5 \dots 0,63$ мкм.

Головки для кольцевого сверления бывают цельными из быстрорежущей стали (диаметром 30...60 мм) и оснащенными напаянными или неперетачиваемыми твердосплавными пластинами (рис. 3.24). В зависимости от диаметра головки число зубьев выбирается в пределах 4–12. На зубьях делается направляющая ленточка шириной 0,8...1,5 мм с обратной конусностью 30...45'. Зубья и канавки на головке наклонены к оси под углом 5° и затачиваются по задней поверхности с углами 6...8°. На передней поверхности зубьев затачивают стружколомающую канавку. В результате такой заточки обеспечивается получение мелкой дробленой стружки, которая легко удаляется из зоны резания с помощью СОЖ. Последняя подается в зону резания через зазор между стержнем и внутренней поверхностью корпуса. СОЖ вместе со стружкой удаляется через зазор между поверхностью отверстия и наружной поверхностью корпуса сверла. Для облегчения отвода стружки на наружной поверхности головки и оправки делают канавки. Ширина стружечной канавки равна ширине зуба. Оправки для крепления головки имеют форму трубы. Головки крепят на ней многозаходной прямоугольной резьбой. Кольцевое сверление обеспечивает обработку отверстий квалитетов точности 11–12 и шероховатость поверхности $Ra = 5 \dots 10$ мкм.

При сверлении в детали образуются кольцевая канавка и сердечник, который по окончании сверления выходит из отверстия.

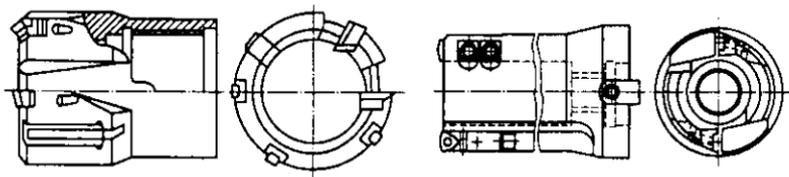


Рис. 3.24. Головки для кольцевого сверления

3.4.2. Конструкции и расчет зенкеров

Цилиндрические зенкеры бывают хвостовые цельные или сварные диаметром 10...32 мм, хвостовые сборные — 32...75 мм, насадные цельные — 25...60 мм, насадные сборные диаметром 40...120 мм.

В целях экономии инструментальных материалов зенкеры больших диаметров делают насадными. Для обработки различных конструкционных и труднообрабатываемых материалов применяют зенкеры с напаянными или механически закрепленными неперетачиваемыми твердосплавными пластинами. Они изготавливаются диаметром 32...80 мм.

К основным конструктивным элементам зенкера относятся его диаметр d и длина L , ширина f и высота t ленточки, ширина пера B , диаметр сердцевин d_c .

Диаметральные размеры зенкеров оговариваются соответствующими стандартами либо определяются расчетом из условий обеспечения припуска на последующее развертывание. В общем случае допуск на диаметр зенкеров принимается по квалитетам h8 или u8.

Длину рабочей части и общую длину хвостового зенкера принимают с учетом условий работы аналогично выбору длины спирального сверла (см. п. 3.4.1). Соотношение длины и диаметра насадных зенкеров из быстрорежущей стали принимается в пределах 1,1...1,8, а твердосплавных — 0,8...1,4, причем большие значения соответствуют меньшим диаметрам зенкера.

Число канавок зенкера назначают минимальным при удалении больших технологических припусков и максимальным при повышенных требованиях к точности обработки отверстия. Хвостовые зенкеры изготавливают диаметром 14...50 мм с числом зубьев 3–4. Насадные зенкеры изготавливают диаметром 30...80 мм обычно с тремя, четырьмя или пятью зубьями. Конструктивные оформления стружечных канавок зенкеров приведены в справочниках либо в соответствующей нормативной литературе.

В зависимости от диаметра и назначения зенкеры могут выполняться с цилиндрическим хвостовиком, коническим хвостовиком Морзе по ГОСТ 25557–82 или насадные, с отверстием конусностью 1:30 по ГОСТ 9472–90. Цилиндрические хвостовики могут иметь поводок для передачи крутящего момента.

Хвостовики зенкеров выполняются из сталей 45, 40Х или 35ХГСА и привариваются или припаяваются к рабочей части. Зенкеры небольших размеров выполняют цельными (из быстрорежущей стали или твердого сплава). Твердость рабочей части зенкеров из быстрорежущей стали составляет 62...65 HRC, хвостовика 37...47, лапок 32...47 HRC.

Соединение корпуса с режущей пластиной или цельной рабочей частью из твердого сплава осуществляется пайкой (латунью или соответствующими припоями) или другими методами, обеспечивающими прочность соединения. Общие принципы соединения частей аналогичны таковым для спиральных сверл.

Средний диаметр конуса Морзе хвостового зенкера рассчитывается аналогично спиральному сверлу. Диаметр посадочного отверстия насадных зенкеров с учетом конусности отверстия 1:30 можно определить по формуле

$$d_{\text{ср}} = 1,4M_{\text{кр}}/P_o,$$

с последующим уточнением по ГОСТ 9472-90. Здесь $M_{\text{кр}}$, P_o — крутящий момент и осевая сила при зенкеровании, определяемые с помощью справочников.

Зубья в корпусе сборных зенкеров крепятся с помощью рифлений (рис. 3.25). Такая конструкция допускает регулирование

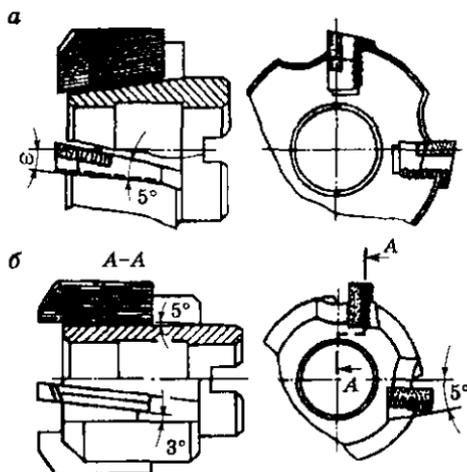


Рис. 3.25. Крепление зубьев в корпусе зенкера с помощью рифлений (а), рифлений и клина (б)

диаметра. Зубья могут быть изготовлены из быстрорежущей или конструкционной стали 45 с напаянными твердосплавными пластинами, имеют угол наклона $\omega = 10 \dots 15^\circ$, $z = 4 \dots 6$.

В связи с широким распространением неперетачиваемых пластин появился ряд конструкций зенкеров с механическим креплением режущих элементов. Фактически это двух- или многозубые расточные головки, жесткие или с возможностью регулирования диаметра в определенном диапазоне (рис. 3.26).



Рис. 3.26. Комбинированные зенкеры, оснащенные сменными неперетачиваемыми пластинами

Для обработки конических углублений, центрования отверстий, снятия фасок в отверстиях применяются *конические зенкеры (зенковки)*, режущие кромки которых имеют угол 2φ , обусловленный формой углубления (рис. 3.27). Зенковки изготавливают из быстрорежущей стали и оснащают твердосплавными пластинами. Если диаметр зенковки более 12 мм, их делают сварными с хвостовиком из сталей 45, 40Х, 45Х. Наибольшее распространение получили зенковки с углом конуса $2\varphi = 60, 75, 90, 120^\circ$.

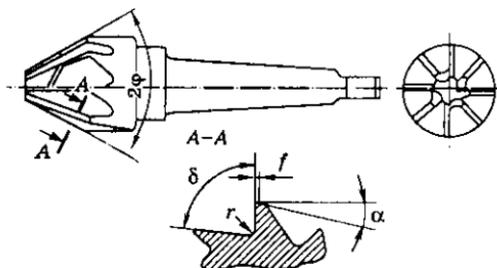


Рис. 3.27. Конический зенкер

Для обработки торцовых поверхностей бобышек и приливов используются *торцовые зенкеры*, или *цековки* (рис. 3.28). У таких зенкеров зубья расположены только на торце. Направление цековки в процессе резания обеспечивается передней цапфой диаметром $d_{ц}$. Зенковки для цилиндрических углублений имеют конструкцию, аналогичную цилиндрическим зенкерам с углами $\varphi = 90^\circ$ и направляющей частью.

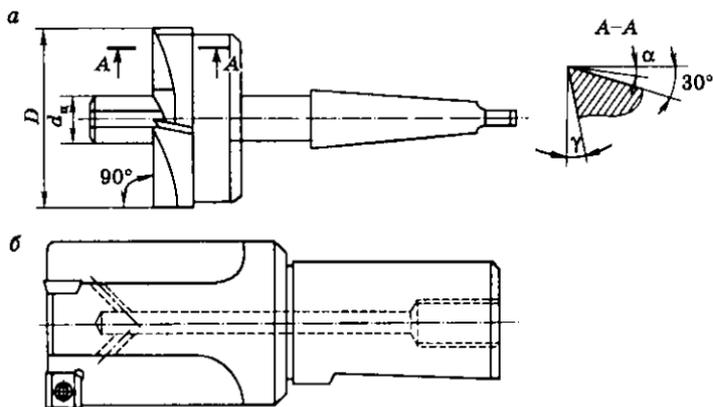


Рис. 3.28. Торцовые быстрорежущий (а) и твердосплавный (б) зенкеры

3.4.3. Конструкции и расчет разверток

Основные конструктивные элементы развертки такие же, как у зенкера. Их значения обычно принимаются в соответствии с рекомендациями нормативной литературы.

Основным конструктивным размером развертки является ее диаметр D , определяющий точность обработки отверстий.

При расчете этого параметра необходимо учитывать диаметр и допуски на обрабатываемое отверстие δ_o , на разбивку отверстия, на изготовление $H = BD$ и износ развертки $I = DF$ (рис. 3.29). Величина разбивки P_{max} и P_{min} в каждом конкретном случае различная и берется по экспериментальным данным. Ориентировочно можно принять $P_{max} = 11 \dots 18$ мкм, $P_{min} = 5$ мкм. Допуск

на изготовление развертки H принимают равным $0,25 \dots 0,4$ от допуска на обрабатываемое отверстие δ_o . Наибольший предельный диаметр развертки $D_{p.б}$ должен быть меньше наибольшего предельного диаметра отверстия $D_{o.б}$ на величину максимальной разбивки P_{max} . Зная $D_{p.б}$ и H , можно определить наименьший предельный диаметр развертки $D_{p.м}$.

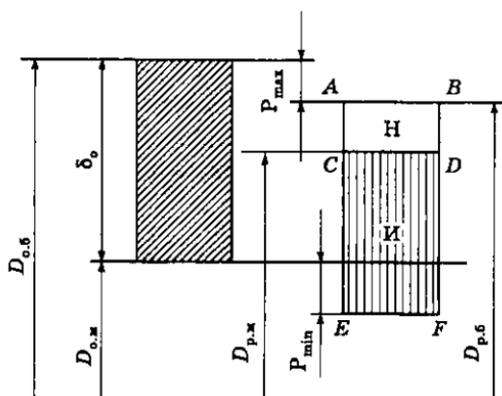


Рис. 3.29. Схема расположения допуска на диаметр развертки

Следовательно, нижнее отклонение новой развертки лежит на линии CD , а верхнее — на линии AB , $И = DF$ — гарантированный запас на износ развертки, линия EF — граница допустимого наибольшего износа развертки, при которой она еще пригодна к работе и обеспечивает получение наименьшего предельного диаметра $D_{o.м}$.

Развертки по сравнению с зенкерами имеют большее число зубьев ($6 \dots 14$), расположенных обычно параллельно оси инструмента. Число зубьев рекомендуется брать четным, чтобы облегчить измерение диаметра микрометром.

Окружной шаг зубьев делают равномерным или неравномерным. Применение разверток с неравномерным шагом снижает шероховатость обработанной поверхности отверстия и уменьшает его огранку. Для удобства измерения диаметра развертки накрест лежащие углы делают равными, чтобы режущие кромки противоположных зубьев находились в одной осевой плоскости.

У разверток, предназначенных для обработки сквозных отверстий с продольными канавками или прерывающихся по длине, делают винтовые зубья. Направление винтовых зубьев обратно направлению резания для предотвращения самозатягивания и заедания развертки. Угол наклона зубьев зависит от обрабатываемого материала.

Развертки *насадные, цельные и хвостовые с напаянными твердосплавными пластинами* по конструкции подобны разверткам из быстрорежущей стали. Насадные развертки (рис. 3.30) имеют диаметр $32 \dots 50$ мм, $z = 6 \dots 10$, $l_p = 30$ мм, $L = 40 \dots 55$ мм. Геометрические параметры выбираются в зависимости от обрабатываемого материала, условий обработки, качества точности, шероховатости обработанной поверхности и др.

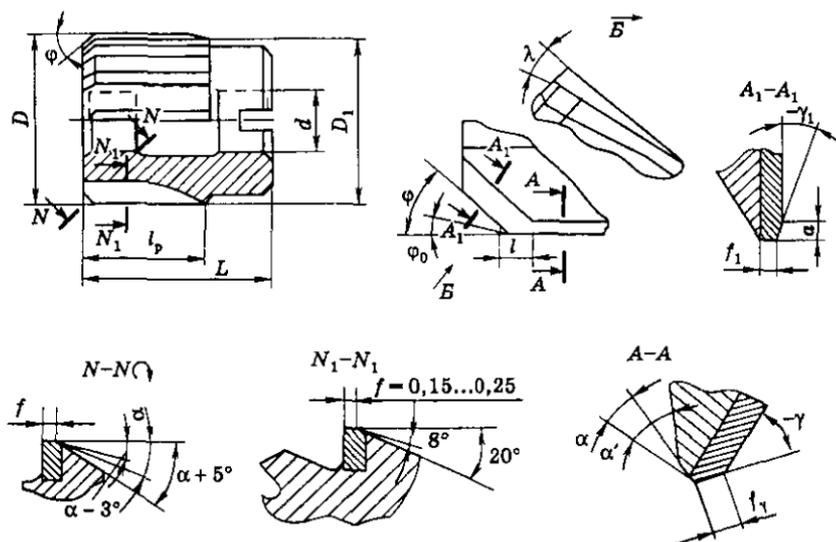


Рис. 3.30. Конструктивные элементы и геометрия насадной твердосплавной развертки

Сборные развертки позволяют сэкономить инструментальный материал, создать более оптимальную геометрию, повысить режущие свойства и размерную стойкость. Такие конструкции, как правило, допускают регулирование диаметра разверток различными способами после изнашивания ножей, их крепления и переточки.

На рис. 3.31 показано крепление ножей 1 развертки продольным плоским клином 2. Клиновые ножи имеют рифления с шагом 0,75 или 1,0 мм, параллельные дну паза, которые наклонены к хвостовику под углом $\alpha = 3 \dots 5^\circ$. Тонкое регулирование на размер производится перемещением ножей вдоль корпуса с помощью гайки 3 и контргайки 4. Кроме того, после предельного изнашивания можно производить перестановку ножей на один шаг рифления. Такая регулировка диаметрального размера является грубой, поэтому после перестановки необходимо развертку перешлифовать на нужный размер и переточить. Ножи могут быть из быстрорежущей стали или из стали 40X с напаянными твердосплавными пластинами.

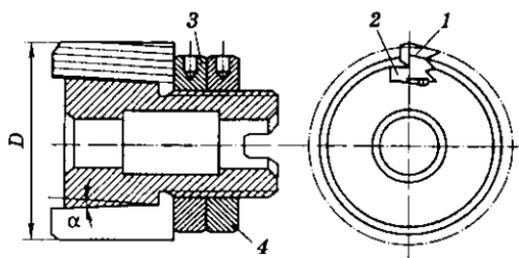


Рис. 3.31. Крепление ножей развертки продольным плоским клином

Хорошо зарекомендовали себя *развертки с кольцевой заточкой* (рис. 3.32), обеспечивающие стабильное получение отверстий до качества точности 7 и шероховатости $Ra = 0,4$ мкм непосредственно после сверления, без применения промежуточных инструментов. На развертках выполняются цилиндрические уступы диаметрами $D_1 = D - 0,2$ мм, $D_2 = D - (0,4 \dots 0,5)$ мм и длиной $l = 2 \dots 4$ мм, торцовые кромки которых работают как главные режущие кромки и имеют задний угол $\alpha = 0^\circ$. Избыточный припуск снимается угловыми кромками с $\varphi = 45^\circ$ и длиной $l_1 = 2$ мм. Геометрия калибрующей части развертки длиной l_k близка к стандартной. Общий припуск, снимаемый разверткой с кольцевой заточкой, может достигать 1 мм.

Необходимость получения отверстий высокой точности в различных материалах потребовала разработки специальных кон-

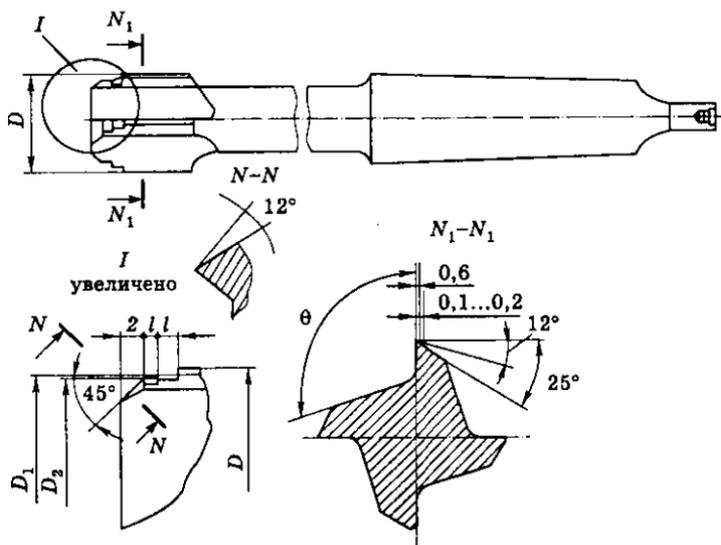


Рис. 3.32. Развертка с кольцевой заточкой

струкций разверток. К ним относится *однокромочная развертка* (рис. 3.33). Такие развертки сочетают свойства режущего, выглаживающего и самоцентрирующего инструмента. Развертки диаметром 10...80 мм выполняются хвостовыми, а больших диаметров (до 150 мм) — насадными. В корпусе развертки 1 прихватом 4 и винтом 5 закрепляют двухстороннюю неперетачиваемую пластину 3 из твердого сплава или быстрорежущей стали, регулирующую в радиальном направлении двумя винтами 6 через сухари 7. В осевом направлении пластину фиксирует штифт 2. Винт 5 с правой и левой резьбой при разборке приподнимает прихват 4 и сохраняет его в таком положении до последующей затяжки. К корпусу 1 припаяны две, три или четыре твердосплавные планки 8. При любом сочетании одна из направляющих планок диаметрально противоположна режущей пластине, что способствует измерениям при регулировании. Планки 8 шлифуют концентрично оси строго по цилиндру с шероховатостью зеркальной поверхности $Ra = 0,06$ мкм.

Достоинством применения данного типа разверток является исключение в большинстве случаев после сверления операции зен-

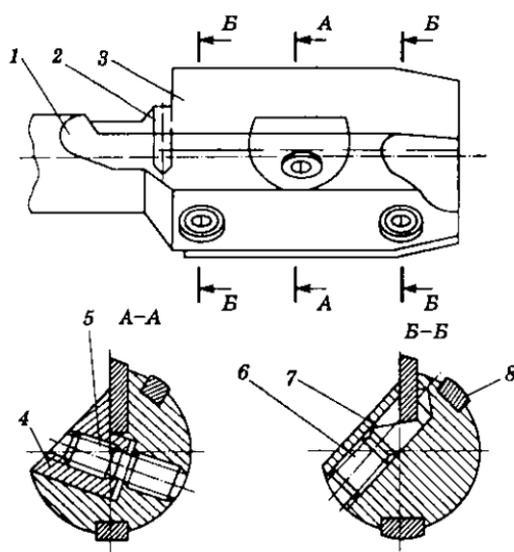


Рис. 3.33. Однокромочная развертка

керования. Припуск на развертывание должен быть $0,3 \dots 0,8$ мм на диаметр. Для обработки высокоточных отверстий следует применять однокромочные развертки с тремя направляющими.

Развертки разжимные и раздвижные имеют возможность регулирования их диаметра. В корпусе *2 разжимной развертки* (рис. 3.34) просверлено отверстие, на одном конце которого нарезана резьба. В глубине отверстия расположена конусная часть. В отверстие развертки вставлен шарик *3* и ввернут регулировочный винт *1*. При ввертывании винт нажимает на шарик, который

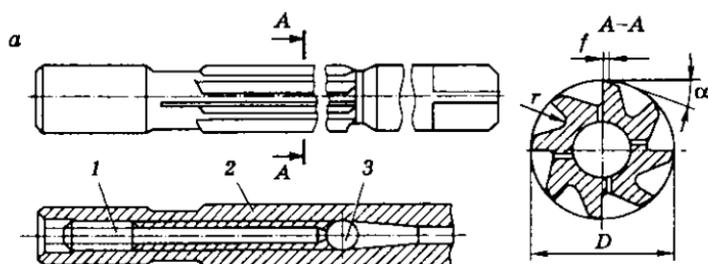


Рис. 3.34. Разжимная развертка

давит на стенки конусного отверстия и разжимает пустотелый корпус развертки, снабженный прорезями. При этом в центральной части развертки происходит увеличение ее диаметра. Пределы регулирования таких разверток по диаметру небольшие. Они составляют, например, для диаметра разверток 6...10 мм — 0,15 мм, 30...50 — 0,50 мм.

Котельные развертки (рис. 3.35) применяются для обработки отверстий под заклепки в металлических листах, наложенных друг на друга. Такие развертки отличаются от обычных машинных тем, что они, как правило, выполняются с углом наклона винтовых канавок ω до 25° , а заборная часть составляет от $1/3$ до $1/2$ длины рабочей части. Угол 2ϕ принимается в пределах от 3 до $5^\circ 30'$. Направление канавок противоположно направлению вращения, а поэтому при работе такими развертками надо прилагать значительные осевые усилия.

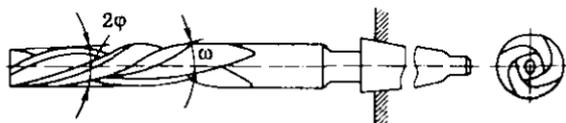


Рис. 3.35. Котельная развертка

Развертка с большим углом наклона винтовых канавок (рис. 3.36) предназначена для обработки сквозных сплошных и прерывистых отверстий в деталях из различных металлов. Угол наклона винтовых канавок $\omega = 60...70^\circ$. Направление зубьев выбирают обратным по отношению к вращению развертки для исключения самозатягивания и заедания в отверстии.

По сравнению с развертками с прямыми режущими зубьями данные развертки работают более плавно и с меньшей радиальной силой. Они имеют больший объем стружечных канавок и увеличенную длину одновременно участвующих в работе зубьев, что улучшает качество обработки. Развертки обеспечивают точность обработанных отверстий качества 7 и шероховатость поверхности $Ra = 1,25...0,63$ мкм. Стойкость таких разверток в 1,5–2 раза выше, чем стойкость разверток с прямыми зубьями.

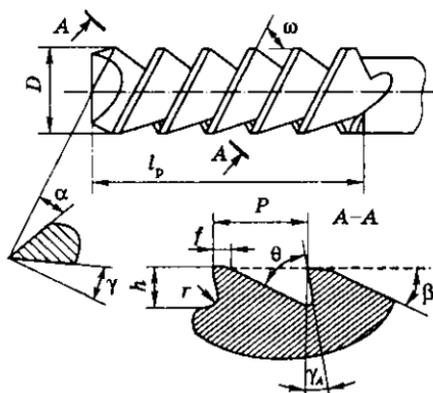


Рис. 3.36. Развертка с большим углом наклона винтовых канавок

3.5. Расчет режимов резания при сверлении, зенкеровании и развертывании

Последовательность расчетов режима резания при сверлении, зенкеровании и развертывании в целом аналогична последовательности расчетов при токарной обработке.

1. Выбор инструментального материала, конструкции инструмента и геометрических параметров его режущей части зависит от свойств обрабатываемого материала, состояния поверхности заготовки и условий резания (жесткости технологической системы, характера обработки и т.п.).

2. Как уже отмечалось, глубина резания при сверлении равна радиусу сверла. При зенкеровании глубина резания определяется припуском на обработку; обычно она равна 1...2 мм, но может достигать 7 мм на сторону. При чистовом развертывании глубина резания обычно принимается 0,05...0,25 мм на сторону, при черновом она может быть увеличена в 2–3 раза.

3. Подача при сверлении (рассверливании) S_0 , мм/об, выбирается в зависимости от технологических и механических факторов (качества обработанной поверхности, характера обработки, прочности сверла и др.).

Подача при зенкеровании, при прочих равных условиях, принимается больше, чем при сверлении или рассверливании. Это объясняется тем, что, имея лучшие условия работы (отсутствие поперечной кромки, более рациональные углы резания вдоль режущей кромки, меньшая глубина резания), зенкер имеет также большее число режущих кромок, так что при одной и той же подаче S_z общая подача S_0 при зенкеровании будет больше.

Подача при развертывании еще выше, чем при зенкеровании, и зависит прежде всего от требуемой точности обрабатываемого отверстия и шероховатости его поверхности.

Подачи, рекомендуемые при сверлении, зенкеровании или развертывании, приводятся в соответствующих разделах справочников по режимам резания. Выбранная по таблицам справочников подача корректируется затем по кинематическим данным станка (берется ближайшая меньшая).

4. После выбора подачи, зная диаметр сверла или глубину резания (припуск на обработку на сторону) и задавшись требуемой стойкостью, производят расчет скорости резания, допускаемой режущими свойствами инструмента. Формулы для расчета величины v при сверлении, зенкеровании и развертывании приведены в п. 3.1.5, 3.2.4 и 3.3.3.

Стойкость сверла может быть принята по эмпирическим зависимостям $T = (1...1,5)D$ при обработке сталей и $T = (2...2,5)D$ при обработке чугунов. Стойкости зенкеров и разверток приводятся в справочниках.

По расчетной скорости резания подсчитывают частоту вращения шпинделя станка: $n = 1000v/(\pi D)$. Полученное значение n уточняют по паспорту станка и принимают ближайшее из имеющихся на станке.

По действительной частоте вращения шпинделя определяют фактическую скорость резания: $v_{\phi} = \pi D n_{\phi} / 1000$.

5. При сверлении или черновом зенкеровании проверяют выбранный режим резания по мощности станка. В этом случае, как и при точении, должно соблюдаться соотношение

$$N_p \leq 1,3\eta N_{ст},$$

где N_p — мощность резания, определяемая по таблицам или формулам (см. п. 3.1.4); 1,3 — коэффициент, учитывающий воз-

возможность кратковременной перегрузки электродвигателя станка; η — коэффициент полезного действия привода главного движения; $N_{ст}$ — мощность электродвигателя.

Если окажется, что мощности электродвигателя станка, на котором должна производиться обработка, не хватает, надо выбрать более мощный станок. Если это невозможно, необходимо уменьшить выбранные значения v или S .

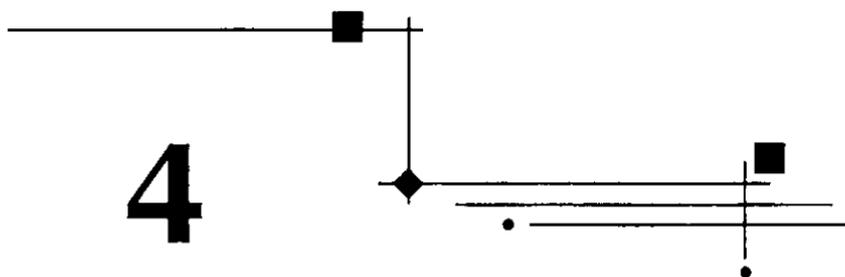
6. Определяют основное время каждого прохода:

$$T_o = \frac{L}{nS_o} = \frac{l+l_1+l_2}{nS_o},$$

где L — длина рабочего хода, мм; n — частота вращения детали или инструмента, мм/об; S_o — подача, мм/об; l — длина обрабатываемой поверхности; l_1, l_2 — длины соответственно врезания и перебега, определяемые по таблицам справочников или следующим зависимостям:

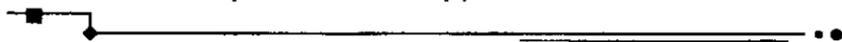
- при сверлении $l_1 = \frac{D}{2} \operatorname{ctg} \varphi + (0,5 \dots 2)$ мм; $l_2 = 1 \dots 3$ мм;
 - при рассверливании $l_1 = 0,2D + (0,5 \dots 2)$ мм; $l_2 = 1 \dots 2$ мм;
 - при зенкеровании $l_1 = 1 \dots 2$ мм; $l_2 = 1 \dots 2$ мм;
 - при развертывании на проход $l_1 = 0,7D + (0,5 \dots 1)$ мм; $l_2 = 10$ мм.
- Здесь D — диаметр инструмента; φ — главный угол в плане.

4



ФРЕЗЕРОВАНИЕ

4.1. Обработка материалов цилиндрическими фрезами



4.1.1. Геометрия цилиндрической фрезы

Фреза — многолезвийный инструмент, применяемый для обработки плоскостей, пазов, шлицев, тел вращения, резьбы, фасонных поверхностей и разрезки. Участие в работе одновременно нескольких зубьев обеспечивает высокую производительность обработки.

Фреза представляет собой тело вращения, на образующей поверхности или на торце которого имеются режущие зубья. Несмотря на многообразие фрез, схема их работы соответствует цилиндрическому или торцовому фрезерованию (рис. 4.1). При цилиндрическом фрезеровании ось фрезы параллельна обрабатываемой поверхности, работа производится зубьями, расположенными на цилиндрической поверхности фрезы. При торцовом фрезеровании ось фрезы перпендикулярна к обработанной поверхности. Кроме зубьев, расположенных на цилиндрической поверхности, работают зубья, имеющиеся на торцовой поверхности.

Цилиндрическая фреза — это цилиндрическое тело, на поверхности которого в продольном направлении прорезаны ка-

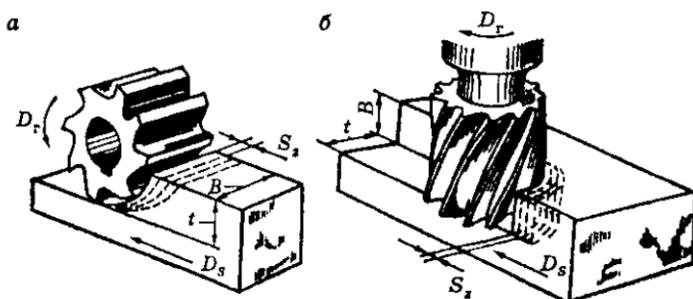


Рис. 4.1. Виды фрезерования:
а — цилиндрическое; б — торцовое

навки для размещения стружки. На пересечении канавок с цилиндрической поверхностью образуются режущие кромки. Для более плавной работы фрезы и увеличения количества одновременно работающих зубьев стружечные канавки делают винтовыми.

Часть стружечной канавки у режущей кромки является передней поверхностью фрезы, а поверхность цилиндра — задней. **Главный передний угол фрезы γ** обеспечивает сход стружки по передней поверхности и измеряется в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке ($N-N$). В этой же плоскости рассматривают задний угол α_N (рис. 4.2).

Главный задний угол фрезы α — угол между касательной к ее задней поверхности и плоскостью резания в рассматриваемой точке. Поскольку траекторию движения этой точки режущей

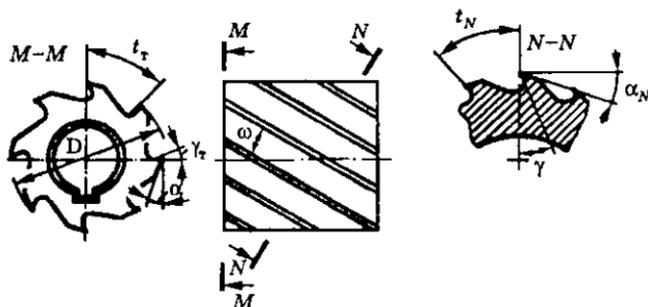


Рис. 4.2. Геометрические параметры режущей части цилиндрической фрезы

кромки, определяющую положение плоскости резания, обычно принимают за дугу окружности, главный задний угол фрезы удобнее измерять в плоскости, перпендикулярной к ее оси ($M-M$). В этой плоскости рассматривается также передний угол фрезы γ_r .

Для повышения равномерности фрезерования используются фрезы с винтовыми зубьями. Если фреза имеет винтовые зубья, то ее режущие кромки являются винтовыми линиями. Угол их наклона к оси фрезы равен ω .

4.1.2. Элементы режима резания и срезаемого слоя при цилиндрическом фрезеровании

При фрезеровании, как и при других видах многолезвийной обработки, элементами режима резания являются глубина резания, подача и скорость резания (см., например, п. 3.2.2 или п. 3.3.2). Глубина резания определяется видом фрезерования и типом фрезы (рис. 4.3). Подача определяется для одиночного лезвия фрезы (S_z , мм/зуб), а в дальнейшем преобразуется в минутную подачу (S_m , мм/мин) по формуле $S_m = S_z z n$, где z — число зубьев фрезы, n — частота ее вращения, об/мин. Этим процесс фрезерования отличается от зенкерования или развертывания, где рассматривают подачу на один оборот инструмента или детали (S_o , мм/об). Скорость резания v , м/мин, рассчитывается для точки, лежащей на периферии фрезы.

В отличие от других видов обработки (точения, сверления и др.) при фрезеровании дополнительно рассматривают *ширину фрезерования* B (это ширина обрабатываемой поверхности в на-

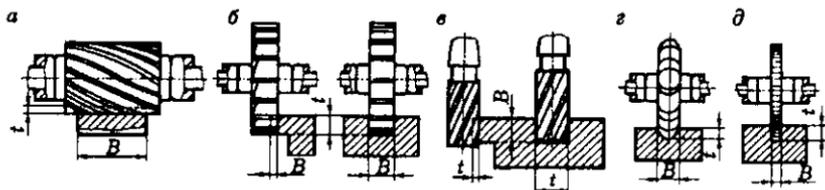


Рис. 4.3. Типы фрез:

a — цилиндрическая; *б* — дисковая и пазовая; *в* — концевые;
г — фасонная; *д* — прорезная

правлении, параллельном оси фрезы). У цилиндрических фрез ширина фрезерования совпадает с шириной обрабатываемой заготовки, у дисковых фрез — с шириной паза, у концевых — с глубиной паза, уступа.

Ширина срезаемого слоя при фрезеровании цилиндрической прямозубой фрезой равна ширине фрезерования ($b = B$). При использовании фрез с винтовыми зубьями ширина фрезерования является переменной величиной, изменяясь от 0 до максимальной величины:

$$b_{\max} = \frac{B}{\cos \omega},$$

а затем от максимальной величины до 0, по мере врезания лезвия фрезы в заготовку. Здесь ω — угол наклона зубьев относительно оси фрезы.

Толщина среза при фрезеровании также является переменной величиной, зависимой от угла контакта заготовки с зубом фрезы. Угол контакта δ — центральный угол, соответствующий дуге контакта фрезы с заготовкой.

Из треугольника BOC (рис. 4.4) находим:

$$\cos \delta = \frac{OC}{BC} = \frac{\frac{D}{2} - t}{\frac{D}{2}} = 1 - \frac{2t}{D}; \quad \delta = \arccos\left(1 - \frac{2t}{D}\right).$$

Полученная формула справедлива для цилиндрических, дисковых и фасонных фрез.

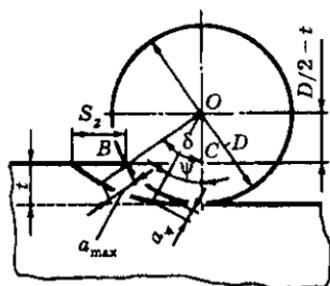


Рис. 4.4. Угол контакта при фрезеровании цилиндрической фрезой

Кроме угла контакта δ различают также *мгновенный угол контакта* ψ — центральный угол между радиусом, проведенным в начальную точку касания зуба фрезы с заготовкой, и радиусом, проведенным в точку мгновенного положения зуба.

При фрезеровании стружка срезается в виде запятой (рис. 4.5), а толщина ее изменяется от нуля до a_{\max} на выходе зуба из контакта с заготовкой. На рисунке точка A соответствует моменту выхода из зоны контакта с заготовкой первого зуба, точка B — второго. Приняв длину дуги BC равной длине отрезка BC , получим $AC = a_{\max} = S_z \sin \delta$. Для произвольного угла контакта ψ можно записать: $a_\psi = S_z \sin \psi$.

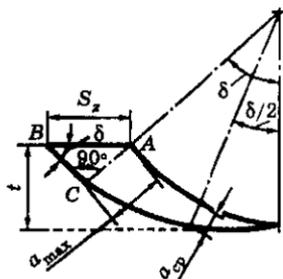


Рис. 4.5. Расчетная схема для определения толщины срезаемого слоя при фрезеровании

При фрезеровании иногда рассматривают понятия средней и срединной толщин среза.

Средняя толщина среза

$$\bar{a} = (a_{\max} + a_{\min})/2 = a_{\max}/2.$$

Срединная толщина среза, соответствующая углу контакта $\delta/2$,

$$a_{\text{ср}} = S_z \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}.$$

Встречное и попутное фрезерование. Врезание зубьев фрезы в заготовку может осуществляться двумя способами: против подачи, так называемое *встречное*, когда направление подачи противоположно направлению вращения фрезы, и по подаче — *попутное*, когда направления подачи и вращения фрезы совпадают (рис. 4.6).

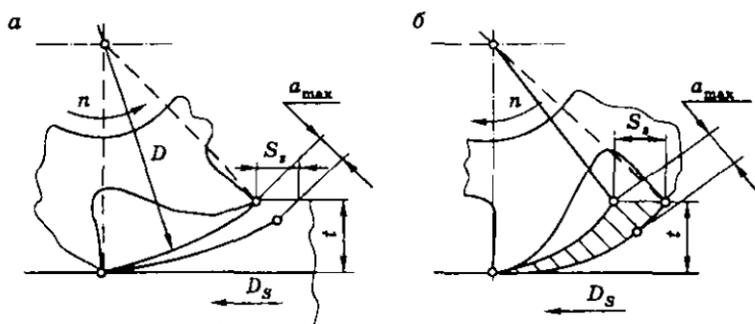


Рис. 4.6. Схемы встречного (а) и попутного (б) фрезерования

При встречном фрезеровании нагрузка на зуб возрастает от нуля до максимума; при этом зубья фрезы, действуя на заготовку, стремятся «оторвать» ее от стола станка или приспособления, в котором она закреплена. Такое направление силы вызывает в ряде случаев (при больших припусках на обработку) упругие деформации в технологической системе, что, в свою очередь, приводит к вибрациям и увеличению шероховатости обработанной поверхности. Зубья фрез при этом интенсивно изнашиваются, так как в момент врезания в заготовку их задние поверхности трутся об упрочненную, уже обработанную поверхность, преодолевая значительную силу трения.

Преимуществом встречного фрезерования перед попутным является работа зубьев фрезы из-под корки. Режущие лезвия в момент входа в зону хрупкого металла повышенной твердости (корки) прекращают контакт своей задней поверхностью с заготовкой, так как происходит скол стружки.

При попутном фрезеровании зуб врезается в материал, начиная работать при максимальной толщине срезаемого слоя и наибольшей нагрузке, что исключает начальное проскальзывание зуба. При этом образуется поверхность с меньшей шероховатостью и более высокой точностью, так как заготовка во время обработки прижимается зубьями фрезы к столу станка, что уменьшает вибрации.

Учитывая достоинства и недостатки рассмотренных методов, попутное фрезерование используют для предварительной и чистовой обработки при отсутствии корки, на жестких станках с компенсаторами зазоров в винтовой передаче стола. Встречное фрезерование рекомендуется для предварительной обработки, особенно при работе по корке.

При встречном фрезеровании ходовой винт и маточная гайка имеют постоянный контакт по одной и той же стороне профиля благодаря постоянному прижиму под действием горизонтальной составляющей силы резания, направленной противоположно движению подачи. Вследствие этого зазор (люфт) между винтом и гайкой будет все время выбран и стол будет перемещаться равномерно. При попутном фрезеровании сила резания будет отрывать гайку от винта, т.е. разрывать контакт между их поверхностями. Как следствие, подача стола будет прерываться, затем снова возобновляться и т.д., что может вызвать вибрации, удары и сколы режущих лезвий фрезы. Поэтому для успешного применения попутного фрезерования необходимо беззазорное соединение ходового винта и маточной гайки стола станка. Это возможно, в частности, при использовании винтовых пар качения, применяемых в станках с ЧПУ.

Равномерность фрезерования. Площадь поперечного сечения стружки при фрезеровании непостоянна. Она изменяется от значения, близкого к нулю, до некоторого максимума. В таких же пределах меняется сила резания. Это, в свою очередь, вызывает неравномерность нагрузки, проявляющуюся в виде вибраций и толчков. Такие явления в процессе фрезерования разрушают режущие лезвия инструмента, способны расстроить станок и снизить срок его службы. Особенно резкие колебания силы резания наблюдаются при работе прямозубыми фрезами. Значительно более равномерным является фрезерование фрезами с винтовыми зубьями. В особых условиях фрезерование такими фрезами можно вести с постоянной площадью суммарного сечения среза, т.е. при отсутствии колебаний силы резания. Такое фрезерование называется *равномерным*.

Условие равномерного фрезерования фрезами со спиральными зубьями можно кратко выразить так: для равномерного фрезерования ширина фрезерования B должна быть равна осевому шагу фрезы h_0 или кратна ему (в целых числах):

$$B = Kh_0 = \frac{\pi KD}{z} \operatorname{ctg} \omega,$$

где $K = 1, 2, 3$ и т.д.; ω — угол наклона винтового зуба фрезы.

Для заготовок различной ширины условие равномерного фрезерования не всегда может быть выполнено. В этих обстоятельст-

вах, если принять $K = 2$ или $K = 3$, неравномерность становится относительно небольшой — изменения силы резания не превышают 20 %, что допустимо (рис. 4.7).

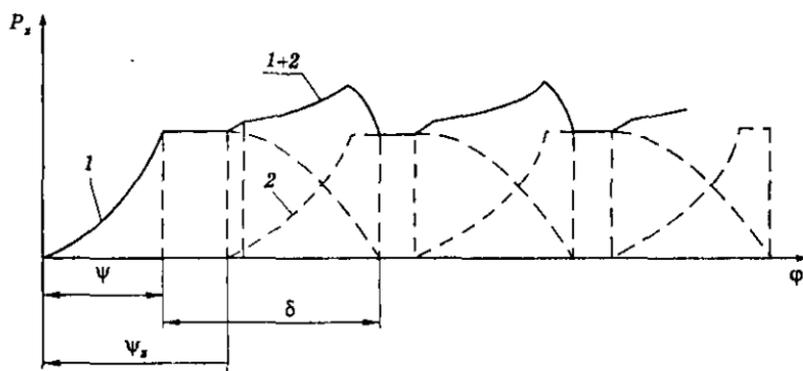


Рис. 4.7. Изменения силы фрезерования при работе цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями (1, 2 — номер зубьев)

Площадь поперечного сечения среза. Произведение глубины резания и подачи или ширины среза и его толщины дает *номинальную*, или *расчетную*, площадь среза (мм^2), которая при резании одной режущей кромкой равна $f = tS = ab$.

Площадь поперечного сечения среза, снимаемая одним зубом цилиндрической фрезы с прямыми зубьями, $f = Ba$. Она изменяется, как и толщина среза, от нуля до максимума:

$$f_{\max} = Ba_{\max} = BS_z \sin \delta = 2BS_z \sqrt{\frac{t}{D} - \left(\frac{t^2}{D^2}\right)}.$$

При фрезеровании в работе участвует одновременно несколько зубьев, поэтому вводится понятие *суммарной площади поперечного сечения среза*. Для ее определения необходимо знать, сколько зубьев одновременно находится в работе и каков мгновенный угол контакта для каждого работающего зуба.

Количество зубьев фрезы, одновременно находящихся в работе, $m = \delta/\eta = \delta z/360^\circ$, где δ — полный угол контакта фрезы с заготовкой; η — центральный угол между двумя соседними зубьями фрезы ($\eta = 360^\circ/z$); z — число зубьев фрезы.

Значение m округляется до ближайшего большего целого числа. Если $1 < m < 2$ то одновременно в работе находится два зуба, если $2 < m < 3$ — три зуба, и т.д. При неизменном диаметре фрезы D количество одновременно работающих зубьев тем больше, чем меньше их шаг t и больше число зубьев фрезы z . При неизменном шаге и числе зубьев фрезы количество одновременно работающих зубьев увеличивается с увеличением ее диаметра.

Мгновенные углы контакта для работающих зубьев 1, 2, 3 фрезы соответственно равны: $\psi_1 = \delta$, $\psi_2 = \delta - \eta$, $\psi_3 = \delta - 2\eta$, ...

Так как для каждого зуба площадь поперечного сечения среза $f = BS_z \sin \psi$, суммарная площадь поперечного сечения среза, снимаемого прямозубой фрезой,

$$F = \sum_{i=1}^m f_i = BS_z (\sin \psi_1 + \sin \psi_2 + \dots + \sin \psi_m) = BS_z \sum_{i=1}^m \sin \psi_i.$$

Для фрезы с винтовыми зубьями толщина среза подсчитывается так же, как и для фрезы с прямыми зубьями: $a = S_z \sin \psi_x$. Но эта толщина переменная не только вдоль дуги контакта (в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы), но и вдоль длины режущей кромки зуба, так как вследствие винтового расположения кромки мгновенные углы контакта для разных ее точек различны.

Площадь суммарного сечения слоя, срезаемого одновременно работающими винтовыми зубьями фрезы,

$$F = \sum_{i=1}^m f_i = \frac{D}{2} \frac{S_z}{\sin \omega} \sum_{i=1}^m (\cos \psi_{1i} - \cos \psi_{2i}),$$

где ω — угол наклона винтовой канавки фрезы; ψ_{1i} , ψ_{2i} — углы контакта двух крайних точек i -й винтовой режущей кромки, участвующих в работе.

4.1.3. Силы и мощность резания при цилиндрическом фрезеровании

При фрезеровании каждый зуб фрезы преодолевает сопротивление резанию со стороны материала заготовки и силы трения, действующие на поверхностях зубьев фрезы. Обычно в контакте с заготовкой находится не один зуб, и поэтому фреза преодолевает

некоторую суммарную силу резания, складывающуюся из сил, действующих на эти зубья. Схема действия сил резания при фрезеровании зависит от принятого способа фрезерования и типа фрезы.

Силу R_1 , которая преодолевает сопротивление резанию, можно разложить на две составляющие: *окружную силу* P_z , действующую по касательной к траектории движения режущего лезвия, и *радиальную* P_y (рис. 4.8). Кроме того, эту же равнодействующую силу R_1 можно разложить на *горизонтальную* P_h и *вертикальную* P_v , *составляющие силы*. Если же фреза имеет винтовые зубья, то наряду с силой R_1 , действующей на зуб в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, возникает *осевая сила* P_x . Общей равнодействующей в этом случае будет сила $R = \sqrt{P_x^2 + R_1^2}$.

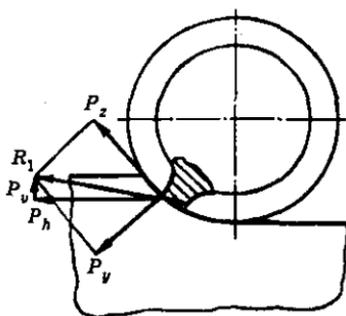


Рис. 4.8. Схема сил резания, действующих на зубья цилиндрических фрез

Силой P_z определяется основная работа по срезанию стружки. По ней подсчитывается эффективная мощность и выполняется расчет деталей механизма главного движения. Радиальная сила P_y оказывает давление на подшипники шпинделя и изгибает оправку фрезы. По горизонтальной силе P_h , называемой иначе *силой подачи*, рассчитывают детали механизма подачи и приспособления для закрепления заготовки. При встречном фрезеровании направление силы P_h противоположно направлению движения стола. При попутном фрезеровании горизонтальная составляющая направлена в сторону движения стола. Эта сила может вызвать вибрации при наличии люфтов в паре винт — гайка. Вертикальная сила P_v стремится при встречном фрезеровании оторвать за-

готовку от стола и приподнять стол над направляющими станины. При фрезеровании цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями равнодействующая силы составляет с осью фрезы острый угол, следовательно, появляется осевая сила P_x , направленная параллельно оси фрезы. В зависимости от направления винтовых зубьев фрезы меняется и направление силы P_x . Для создания более благоприятных условий фрезерования целесообразно применять фрезу с таким направлением зуба, чтобы осевая сила была направлена к шпинделю; в противном случае она будет стремиться вытянуть фрезу с оправкой из посадочного конусного отверстия шпинделя.

Формулы для подсчета окружной силы (в ньютонах) при фрезеровании приведены в справочниках режимов резания. Например, для цилиндрических, концевых, дисковых, прорезных фрез из быстрорежущей стали при обработке конструкционной стали 215 НВ ($\sigma_b = 750$ МПа)

$$P_z = 682t^{0,86}S_z^{0,72}BzD^{-0,86}.$$

Анализ эмпирических зависимостей для случая обработки цилиндрическими фрезами позволяет сделать следующие выводы:

- 1) сила резания P_z прямо пропорциональна ширине фрезерования B и числу зубьев фрезы z ;
- 2) влияние подачи на силу резания характеризуется, как и при точении, показателем степени, близким к 0,75;
- 3) показатель степени при t меньше единицы, в то время как при точении $x_p = 1$. Это объясняется тем, что глубины резания при фрезеровании и точении являются в сущности разными параметрами. Если при точении глубина резания t характеризует ширину среза, то при фрезеровании она определяет угол контакта δ , а также срединную толщину срезаемого слоя. Поэтому с увеличением t уменьшается удельная сила резания;
- 4) с увеличением диаметра D фрезы сила резания становится меньше, так как при этом уменьшается число одновременно работающих зубьев при постоянных z , t и B . Действительно, с увеличением D полный угол контакта δ уменьшается, а угол между зубьями $\eta = 360^\circ/z$ остается постоянным, а значит, уменьшается и число одновременно работающих зубьев; с увеличением D

уменьшается толщина среза, а следовательно, и площадь поперечного сечения среза и сила резания. Напомним, что $a_{\max} = S_z \sin \delta$. Но при большем диаметре фрезы полный угол контакта δ будет меньшим, а значит, и a_{\max} уменьшается.

Другие составляющие сил резания при фрезеровании обычно определяются не эмпирическими формулами, а по соотношениям, связывающим их с окружной силой P_z . Для встречного фрезерования цилиндрической фрезой с прямыми зубьями эти соотношения имеют следующие значения: $P_y = (0,4 \dots 0,6)P_z$; $P_h = (1,1 \dots 1,2)P_z$; $P_v = (0,2 \dots 0,3)P_z$; для попутного фрезерования: $P_y = (0,4 \dots 0,6)P_z$; $P_h = (0,8 \dots 0,9)P_z$; $P_v = (0,7 \dots 0,9)P_z$. Для фрез с винтовыми зубьями необходимо учитывать еще действие осевой силы P_x , зависящей от угла ω и равной примерно $(0,35 \dots 0,55)P_z$. Действие осевых сил желательно устранять. Достигается это за счет применения двоянных фрез с разнонаправленными винтовыми зубьями (рис. 4.9).

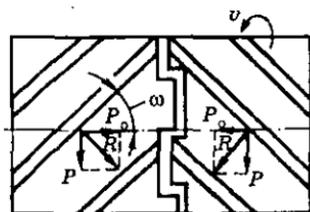


Рис. 4.9. Схема действия сил резания на составную цилиндрическую фрезу

Значительное влияние на силы резания оказывает передний угол γ зубьев фрезы. Чем больше γ , тем меньше P_z . Опытным путем установлено, что увеличение переднего угла γ на 1° уменьшает силу P_z на $1,0 \dots 1,5\%$. Если принять для цилиндрических фрез при $\gamma = 10^\circ$ $P_z = 1,0$, то при $\gamma = -10; 0; 20^\circ$ соответственно $P_z = 1,26; 1,12; 0,87$.

При фрезеровании, зная значения P_z и v , можно рассчитать мощность, затрачиваемую на фрезерование:

$$N_p = P_z v = C_N t^{x_p} S_z^{y_p} B z n D^{q_N}.$$

Мощность, затрачиваемая на подачу, составляет не более 15 % от мощности резания. Поэтому полная расчетная мощность

$$N_{дв} = 1,15N_p/\eta_{ст},$$

где $\eta_{ст}$ — КПД станка.

Для цилиндрических, концевых, дисковых, прорезных фрез из быстрорежущей стали при обработке конструкционной стали 215 НВ

$$N_p = 3,5 \cdot 10^{-5} t^{0,86} S_z^{0,72} B z n D^{0,14}.$$

4.1.4. Износ и стойкость цилиндрических фрез

Цилиндрические, концевые, дисковые, фасонные фрезы изнашиваются преимущественно по задней поверхности (рис. 4.10), по передней поверхности износ практически не наблюдается. Стойкости фрез зависят от их назначения, диаметра и условий обработки и приводятся в справочной литературе.

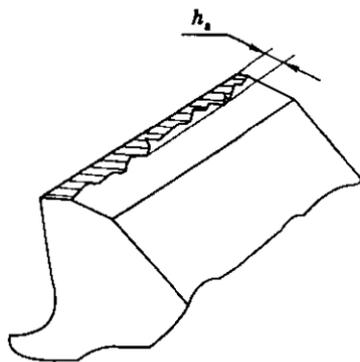


Рис. 4.10. Характер износа зубьев цилиндрических фрез

Влияние режимов обработки на стойкость фрез в целом аналогично описанному для других процессов резания. Общий вид зависимости имеет вид

$$v = \frac{C_v D^{w_v}}{T^{m_t} t^{x_v} S_z^{y_v} B^{n_v} z^{g_v}} K_v.$$

В приведенной формуле коэффициент K_v учитывает измененные условия работы фрезы. Значения коэффициента C_v и показателей степени для каждого конкретного случая обработки различны и приводятся в справочно-нормативной литературе. Влияние условий резания на период стойкости фрезы обусловлено их влиянием на температуру резания. Например, увеличение диаметра фрезы улучшает теплоотвод, а следовательно, увеличивает T и v_T . При фрезеровании этому способствует также уменьшение толщины среза при большем диаметре фрезы. При увеличении числа зубьев уменьшаются их шаг и масса металла, приходящаяся на один зуб, следовательно, ухудшается теплоотвод и снижается T . Ширина фрезерования B играет такую же роль, как ширина среза при точении, поэтому n_v невелико ($\approx 0,1 \dots 0,2$). Значением t при фрезеровании определяется толщина среза, следовательно x_v при фрезеровании больше, чем при точении.

4.2. Обработка материалов торцовыми фрезами

4.2.1. Геометрия торцовой фрезы

У торцовых фрез зубья подобны проходным резцам. В резании кроме главной участвует вспомогательная режущая кромка. Зуб фрезы имеет углы в плане φ , φ_1 , ϵ (рис. 4.11). Главный передний угол фрезы γ , как и для всех режущих инструментов, измеряется в главной секущей плоскости. С некоторыми погрешностями ее можно считать перпендикулярной к режущей кромке (плоскость $N-N$). Тогда угол γ в рассматриваемой точке — это угол между касательной к передней поверхности в этой точке и основной плоскостью. У торцовых фрез она проходит по касательной к траектории вращательного движения рассматриваемой точки.

Главный задний угол α фрезы измеряется в плоскости, в которой лежит траектория движения точки режущей кромки, т.е. в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы ($A-A$) и совпадающей с направлением подачи.

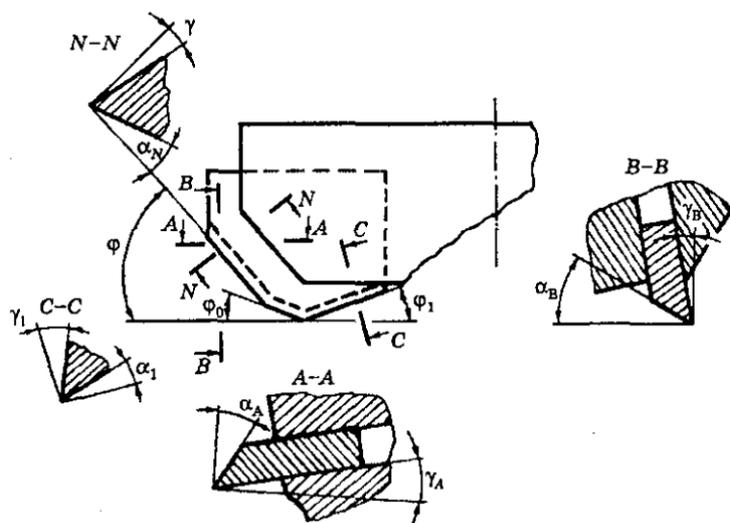


Рис. 4.11. Геометрические параметры режущей части торцевой фрезы

В главной секущей плоскости $N-N$ определяют нормальный задний угол α_N фрезы: $\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi$. У торцевой фрезы рассматривают также поперечный передний угол γ_A в плоскости $A-A$ и продольные передний γ_B и задний α_B углы фрезы в секущей плоскости $B-B$, параллельной оси фрезы. В сечении $C-C$ измеряется вспомогательный задний угол α_1 .

4.2.2. Элементы режима резания и срезаемого слоя при торцовом фрезеровании

Элементы режима резания и срезаемого слоя при торцовом фрезеровании в целом аналогичны описанному для цилиндрического фрезерования (см. п. 4.1.2). Ширина фрезерования у торцевых фрез совпадает с шириной B обрабатываемой заготовки (рис. 4.12). Ширина срезаемого слоя для торцевых фрез

$$b = \frac{t}{\sin \varphi \cos \lambda},$$

где t — глубина фрезерования; φ — угол в плане режущей кромки зуба торцевой фрезы; λ — угол наклона режущей кромки.

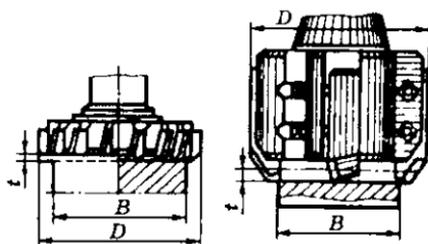


Рис. 4.12. Схемы торцового фрезерования

Торцовое фрезерование бывает симметричным и асимметричным (рис. 4.13). В последнем случае траектория движения оси фрезы смещена относительно оси симметрии обрабатываемой заготовки. Угол контакта торцевых фрез при симметричном фрезеровании равен

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{B/2}{D/2} = \frac{B}{D}.$$

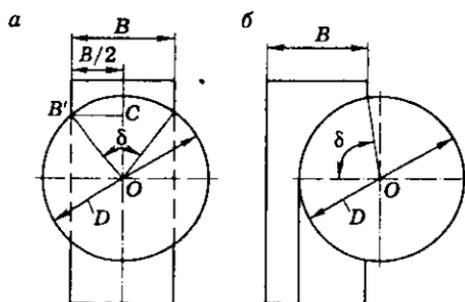


Рис. 4.13. Угол контакта при симметричном (а) и несимметричном (б) фрезеровании торцевой фрезой

Толщина среза является переменной вдоль длины дуги контакта торцевой фрезы. На входе и выходе фрезы из контакта с деталью она равна a_1 . Для произвольного положения зуба при угле контакта ψ получим $a = S_2 \sin \psi$, а максимальное значение $a_{\max} = S_2$.

При встречном асимметричном фрезеровании толщина среза изменяется от 0 на входе до a_{\max} на выходе. При попутном асимметричном фрезеровании толщина среза будет изменяться от a_{\max} на входе до 0 на выходе фрезы.

4.2.3. Силы и мощность резания при торцовом фрезеровании

При фрезеровании торцовыми фрезами действуют те же составляющие силы резания, что и при фрезеровании цилиндрическими (рис. 4.14).

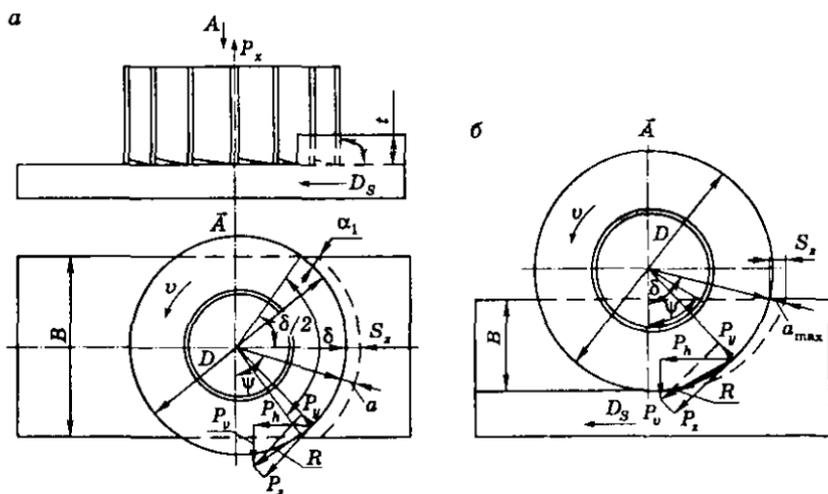


Рис. 4.14. Схема сил резания, действующих на зубья торцовых фрез при фрезеровании:
а — симметричном; б — асимметричном

Так же как и для цилиндрических фрез, в справочной литературе приводятся формулы для расчета главной (окружной) силы резания P_z , а остальные составляющие определяются следующими соотношениями:

а) при симметричном фрезеровании

$$P_h = (0,3 \dots 0,4) P_z,$$

$$P_v = (0,85 \dots 0,95)P_z,$$

$$P_x = (0,5 \dots 0,55)P_z;$$

б) при асимметричном встречном фрезеровании

$$P_h = (0,6 \dots 0,9)P_z,$$

$$P_v = (0,45 \dots 0,70)P_z,$$

$$P_x = (0,5 \dots 0,55)P_z;$$

в) при асимметричном попутном фрезеровании

$$P_h = (0,15 \dots 0,30)P_z,$$

$$P_v = (0,9 \dots 1)P_z,$$

$$P_x = (0,5 \dots 0,55)P_z.$$

Мощность резания при фрезеровании торцовыми фрезами определяется по формулам, приведенным в п. 4.1.3. Значения коэффициентов и показателей степени приводятся в справочной литературе.

4.2.4. Износ и стойкость торцовых фрез

При торцовом фрезеровании угол контакта больше, чем при цилиндрическом, и стружка большее время соприкасается с передней поверхностью. Поэтому износ наблюдается не только на задней, но и на передней поверхности фрезы. Учитывая, что торцовые фрезы обычно оснащаются твердосплавными или керамическими пластинами, более хрупкими по сравнению с быстрорежущей сталью, в зоне вершины лезвия часто наблюдаются сколы передней поверхности вследствие действия ударных нагрузок.

Торцовые фрезы обычно имеют сложную конструкцию и достаточно большой диаметр. Они гораздо дороже цилиндрических, концевых или дисковых. Поэтому их периоды стойкости более высокие, иногда достигают 500 мин. Скорость резания, обеспечивающая заданную стойкость, рассчитывается по формулам, аналогичным приведенной в п. 4.1.4. Коэффициенты и показатели степени определяются по справочникам.

4.3. Современные конструкции фрез

Многообразие операций, выполняемых на фрезерных станках, привело к появлению большого количества типов фрез.

Цилиндрические фрезы (рис. 4.15) используются при обработке плоскостей. Эти фрезы могут быть с прямыми и винтовыми зубьями. В последнем случае обеспечивается более равномерное фрезерование. Для компенсации осевых усилий иногда используют двоянные цилиндрические фрезы, у которых зубья имеют разное направление наклона.

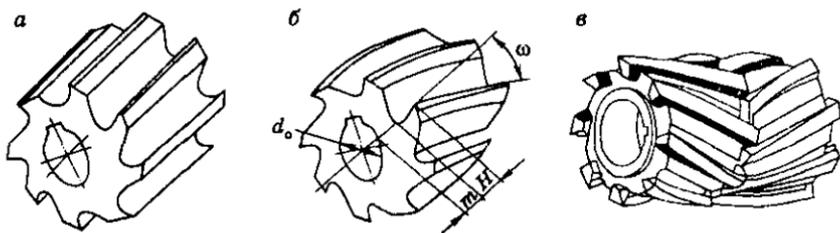


Рис. 4.15. Цилиндрическая фреза с прямыми (а) и винтовыми (б) канавками и двоянная (в)

Торцовые фрезы (рис. 4.16) широко применяются при обработке плоскостей. Ось их установки перпендикулярна обработанной поверхности детали. В отличие от цилиндрических фрез, где все точки режущих кромок являются профилирующими и формируют обработанную поверхность, у торцовых фрез профилирующими являются только вершины зубьев. Это позволяет использовать разнообразные формы режущих кромок (круглые, ломаные и т.д.).

Угол контакта фрезы с заготовкой определяется только шириной фрезерования и диаметром фрезы. Это обеспечивает более плавную ее работу. Торцовые фрезы гораздо массивнее и жестче, чем цилиндрические, и поэтому более предпочтительны при обработке плоскостей.

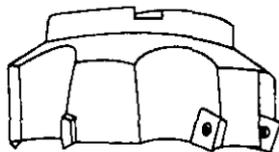


Рис. 4.16. Торцовая фреза

Дисковые фрезы используются при фрезеровании пазов, канавок и уступов. Пазовые дисковые фрезы (рис. 4.17, а) имеют режущие кромки только на цилиндрической поверхности и могут обрабатывать неглубокие пазы. Для уменьшения трения по торцам их зубьев делается небольшое поднутрение с углом $\varphi_1 = 30^\circ$.

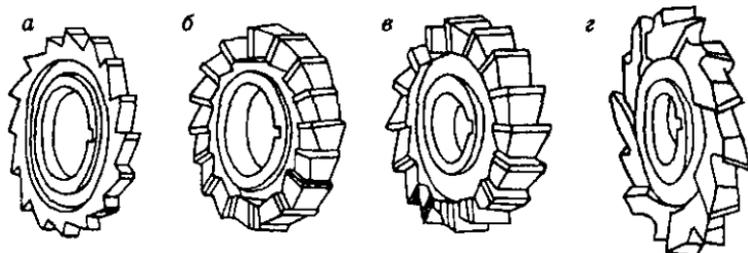


Рис. 4.17. Дисковые фрезы

Двух- и трехсторонние дисковые фрезы (рис. 4.17, б, в) имеют зубья не только на цилиндрической поверхности, но и на одном или двух торцах, что позволяет обрабатывать пазы большей глубины и фрезеровать уступы. Поскольку у фрез с прямыми зубьями углы на торцовых кромках равны нулю, условия их работы ухудшаются. Чтобы исключить этот недостаток, используют двухсторонние фрезы с наклонными, а трехсторонние — с разнонаправленными зубьями (рис. 4.17, г). В последнем случае зубья с каждого торца, имеющие отрицательные передние углы, срезаны. Для разрезки, прорезания узких пазов и шлицев используют тонкие дисковые фрезы — пилы.

Угловые фрезы используются при фрезеровании угловых пазов и наклонных плоскостей, в том числе стружечных канавок различных инструментов. Одноугловые фрезы (рис. 4.18, а) имеют режущие кромки на конической поверхности и торце, двухугловые (рис. 4.18, б) — на двух смежных конических поверхностях. Угловые

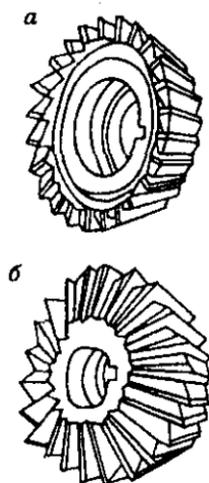


Рис. 4.18. Угловые фрезы

фрезы малых размеров изготавливают концевыми, с цилиндрическим или коническим хвостовиком.

Концевые фрезы (рис. 4.19, а) применяют для обработки глубоких пазов, контурных выемок, уступов, взаимно перпендикулярных плоскостей. В шпинделе станка они крепятся коническим или цилиндрическим хвостовиком. Основную работу резания у этих фрез выполняют режущие кромки, расположенные на цилиндрической поверхности, а торцовые кромки только зачищают дно канавки. Зубья таких фрез выполняются, как правило, наклонными или винтовыми, с углом наклона до $30 \dots 45^\circ$. Разновидностью концевых фрез являются **шпоночные двухзубые фрезы** (рис. 4.19, б). Они имеют возможность углубляться в деталь при осевом движении подачи, высверливая отверстие, а затем двигаться вдоль паза. В ходе осевого перемещения основную работу выполняют торцовые кромки. Для этого одна из них доходит до оси фрезы и работает как кромка сверла с углом $\varphi = 90^\circ$.

Для обработки Т-образных пазов используют специальные **Т-образные фрезы** (рис. 4.20). Зубья этих фрез делают разнонаправленными, с поднутрением на обоих торцах $\varphi_1 = 1^\circ 30' \dots 2^\circ$. С целью улучшения условий размещения стружки на зубьях то с одного, то с другого торца затачивают фаски $0,5 \times 30^\circ$.

При обработке поверхностей сложного профиля получили большое распространение как дисковые, так и хвостовые **фасонные фрезы** (рис. 4.21).

При фрезеровании глубоких пазов прорезными фрезами, а также у отрезных фрез и пил широко используются усовершенствованные

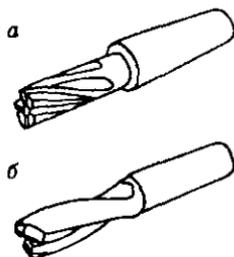


Рис. 4.19. Концевая (а) и шпоночная (б) фрезы

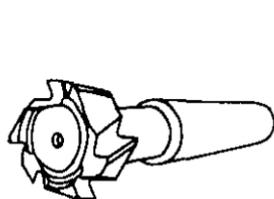


Рис. 4.20. Т-образная фреза

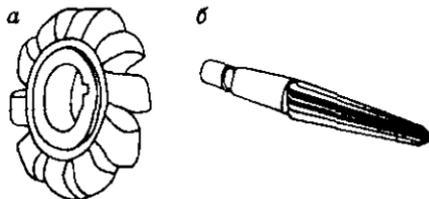


Рис. 4.21. Фасонная дисковая (а) и хвостовая (б) фрезы

ванные схемы резания. Например, у прорезных фрез поочередно с каждой стороны снимают фаски на $1/3$ ширины фрезы под углом 45° (рис. 4.22, а). Такие фаски снижают нагрузку на зубьях, улучшают условия резания, предохраняют фрезу от защемления и поломки. Близкая по замыслу схема используется в отрезных фрезах с крупным шагом. В этом случае на первом зубе секции выполняют фаски под углом 45° с двух сторон, а второй зуб без фасок делают ниже первого на Δ (рис. 4.22, б).

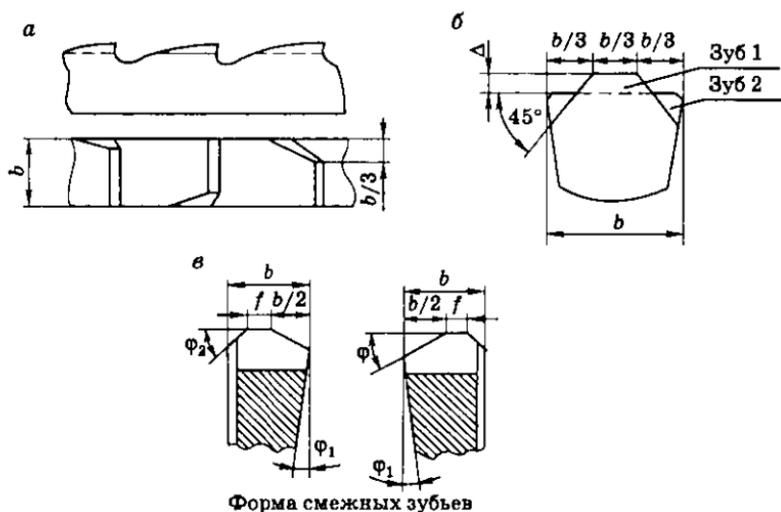


Рис. 4.22. Схемы резания прорезными и отрезными фрезами

В схеме, приведенной на рис. 4.22, а, режущие зубья выполнены двухсторонними, а сочетание право- и леворежущих зубьев образует фрезу трехстороннего резания. Каждый зуб имеет ломаную режущую кромку, центральный участок которой параллелен оси фрезы, а боковые участки наклонены к ней. Участок со стороны угла φ выбирается равным половине ширины фрезы. Угол φ_2 назначается конструктивно, но не более 25° . На боковых сторонах выполнены поднутрения под углом φ_1 .

Для снятия больших припусков приспособлены так называемые «кукурузные» цилиндрические или концевые фрезы (рис. 4.23). В этом случае на цилиндрических режущих кромках выполняют

кольцевые стружкоразделительные канавки, смещенные относительно друг друга на соседних зубьях на величину $x = P/z$, где P — шаг винтовой линии точек режущей кромки; z — число зубьев фрезы. В результате отдельные зубья срезают стружки шириной b , соответствующей ширине режущей кромки, и толщиной в одной своей части a_2 , соответствующей подаче на зуб S_2 , и в другой — a_0 , соответствующей подаче на оборот фрезы S_0 . Расположение режущих кромок на зубьях фрезы со смещением в осевом направлении приводит к тому, что основная масса металла срезается с увеличенной толщиной стружки и, как следствие, с меньшими усилиями и мощностью резания.

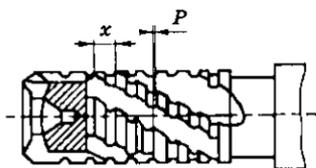


Рис. 4.23. Концевая «кукурузная» фреза

При обработке торцовыми фрезами плоскостей с большими припусками используют *ступенчатую схему* резания, где общая глубина резания распределяется между двумя или тремя зубьями. В последнем случае (рис. 4.24) зуб 1 удаляет слой металла $t_1 = (0,5 \dots 0,6)t$, зуб 2 удаляет слой металла $t_2 = 0,3t$ и зуб 3 удаляет слой металла $t_3 = 0,1t$. Для снижения шероховатости обработанной поверхности зубья могут иметь зачистные кромки длиной $l = 1,2S_2$. Зубья в корпусе расположены так, что 1 находится на наибольшем диаметре и имеет наименьший вылет из корпуса, а 3 — на наименьшем диаметре и имеет наибольший вы-

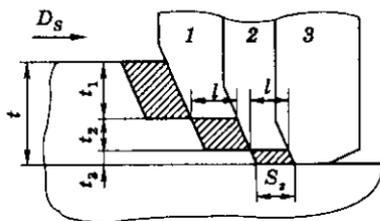


Рис. 4.24. Ступенчатая схема резания при торцовом фрезеровании

лет. Такая схема позволяет срезать слой металла до $t = 20 \dots 25$ мм, снизить уровень вибраций, повысить период стойкости фрезы.

Фрезы сборные отличаются уменьшенным расходом инструментальных материалов, повышенной долговечностью корпуса и деталей крепления, возможностью достаточно простого изменения геометрии режущей части в ходе эксплуатации. Сборные фрезы состоят из корпуса, режущих и крепежных элементов. Режущие элементы могут быть целиком выполнены из быстрорежущей стали, оснащены напаянными либо неперетачиваемыми пластинами из твердого сплава, минералокерамики, сверхтвердых материалов. В наиболее распространенных конструкциях фрез режущие элементы — ножи крепятся в корпусах клиньями (рис. 4.25, а, б). Для фрез малого диаметра могут использоваться сменные твердосплавные коронки, ввинчиваемые в стальной хвостовик (рис. 4.25, в).

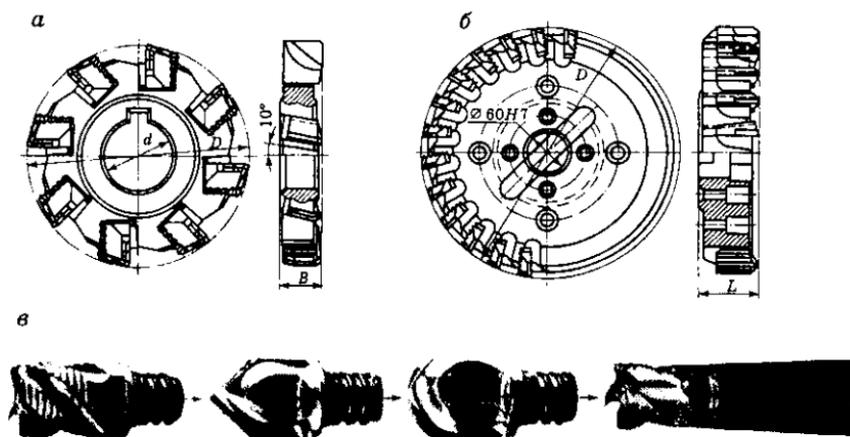


Рис. 4.25. Конструкции сборных фрез, оснащенных ножами и коронками

Наиболее эффективны фрезы, оснащенные сменными неперетачиваемыми пластинами. В схеме, приведенной на рис. 4.26, а, неперетачиваемые пластины 4 крепятся прихватом 6, затягиваемым винтом 2. Пластина при этом плотно прижимается к гнезду державки 5, а та — к корпусу 1 фрезы с помощью винта 3. Жесткий прихват 6 обеспечивает надежное крепление пластины при воздействии на последнюю сил резания.

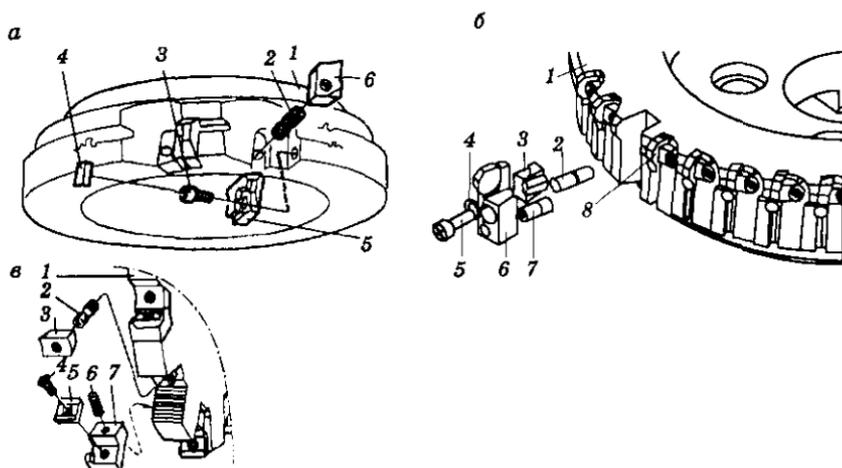


Рис. 4.26. Схемы крепления пластин прихватом в конструкциях торцовых и дисковых фрез

В схеме, приведенной на рис. 4.26, б, непереключаемые пластины крепятся в державке 6 прихватом 3, затягиваемым винтом 2. Сама державка крепится в корпусе 1 винтом 5 и шайбой 4. В конструкции предусмотрена возможность регулирования торцового биения фрезы в сборе с помощью эксцентриков 7.

Более сложное крепление используется в сборных регулируемых дисковых фрезах (рис. 4.26, в). Режущая пластина 5 крепится в державке 7 винтом 4, а та, в свою очередь — в корпусе 1 с помощью винта 6. Окончательное закрепление пластин осуществляется прихватом 3 и винтом 2 с разнонаправленной резьбой. Рифления в корпусе позволяют обеспечить перемещение державок вдоль оси фрезы и точную настройку фрезы по ширине.

Крепление сменных непереключаемых пластин силами резания используется в от-

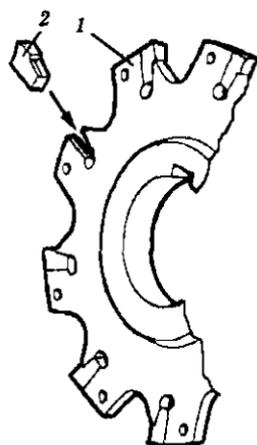


Рис. 4.27. Крепление пластин силами резания

резных и прорезных фрезах (рис. 4.27). В этом случае пластины 2 размещаются в клиновых пазах корпуса 1.

Перспективным направлением является использование сборных фрез кассетной конструкции. Корпус в этом случае унифицирован, а передние углы пластины, установленной в кассете, могут изменяться в широких пределах (рис. 4.28). Таким образом, с минимальной переналадкой можно обеспечить оптимальные условия обработки различных материалов: стали, чугуна, алюминия и т.д.

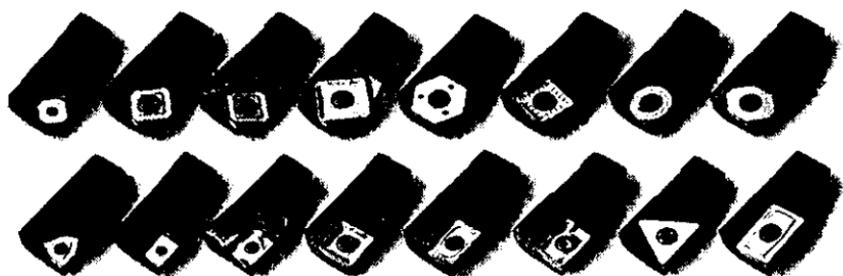


Рис. 4.28. Кассеты для торцовых сборных фрез

Современные фрезы оснащаются также сменными пластинами из сверхтвердых материалов. Такие пластины могут иметь размеры и форму, соответствующие пластинам из твердого сплава, но могут выполняться также цельными. На рис. 4.29 показана конструкция сборной торцевой фрезы со сменными кассетами. Фреза состоит из корпуса 1 и кассет с режущими пластинами 4 круглой, ромбической или квадратной формы. Кассета включает державку 3, крепежный винт 2 и прихват 5. Пластины крепятся в гнезде державки 3 прихватом 5. Кассета крепится в корпусе фрезы винтом 6.

Используя неперетачиваемые пластины, можно проектировать как фрезы универсального назначения (торцовые, цилиндрические, концевые, дисковые и т.д.), так и специальные (рис. 4.30).

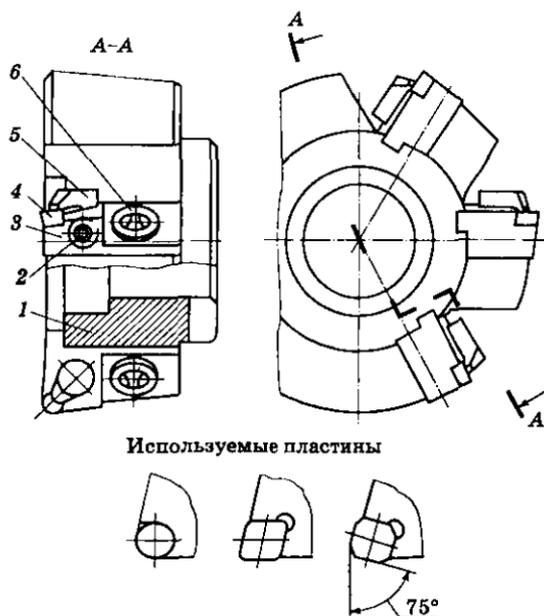


Рис. 4.29. Торцовая фреза с пластинами из сверхтвердых материалов

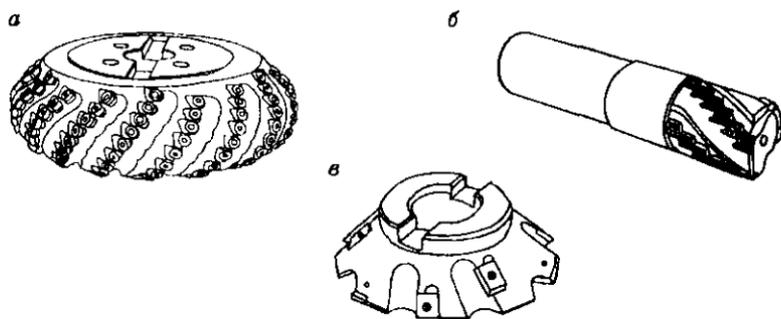


Рис. 4.30. Фрезы с многогранными пластинами:
 а — фасонная; б — концевая длиннофлюсовая; в — однофлюсовая

4.4. Расчет и конструирование фрез

Число зубьев фрезы z — важный параметр, от которого зависят производительность обработки, уровень сил резания, потребляемая мощность. Чем меньше зубьев у фрезы одного и того же диаметра, тем больше объем канавок для размещения стружки (это особенно важно при выполнении черновых работ). Чем больше зубьев, тем выше плавность работы фрезы и меньше величина сил резания, приходящихся на один зуб. Поэтому число зубьев и их форма должны быть оптимальными для конкретного вида работ.

Число зубьев фрезы можно определить по эмпирической формуле:

$$z = m\sqrt{D},$$

где m — коэффициент, зависящий от условий работы и конструкции фрезы.

Значения коэффициентов m для некоторых типов фрез приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1
Значение коэффициента m для различных фрез

Тип фрезы	m
Цилиндрические:	
цельные с крупным зубом	1,1
цельные с мелким зубом	1,8
сборные (только с крупным зубом)	0,8
Торцовые:	
цельные с крупным зубом	1,1
цельные с мелким зубом	1,8
сборные	1,1–1,2
Дисковые с мелким зубом	2

Форма зуба в значительной степени определяет работоспособность фрезы и должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать достаточную прочность и массивность зуба, что улучшает теплоотвод и снижает интенсивность изнашивания зубьев;

- образовывать межзубую впадину необходимого объема для размещения стружки и хорошего ее отвода;
- не иметь острых углов и резких переходов во впадине во избежание трещин при закалке;
- допускать достаточно большое количество переточек.

Зубья бывают острозаточенной и затылованной формы.

Острозаточенная форма — наиболее распространенная, достаточно технологичная и универсальная. В настоящее время известно несколько ее разновидностей. Одноугольная форма (рис. 4.31, а) — наименее прочная, но наиболее простая и технологичная, формируется за один проход, задний угол образуется при заточке на ширине ленточки f . Такая форма применяется на торцевых зубьях цельных фрез, цилиндрических фрез малого диаметра и фасонных фрез. Канавка зуба ограничена углом впадины θ , а зуб — углом η . Обычно $\eta = 45...50^\circ$ и выбирается из условия прочности фрезы); γ — передний угол. С целью сохранения номенклатуры канавочных фрез принимают $\theta = 45...100^\circ$ через каждые 5° .

Приведенная формула справедлива только для фрез с прямыми зубьями. Для фрез с винтовыми зубьями углы θ , η и ϵ рассматриваются в плоскости, перпендикулярной к главным режущим кромкам, и в этом случае

$$\theta = \eta + \frac{360 \cos^3 \omega}{z} + \gamma.$$

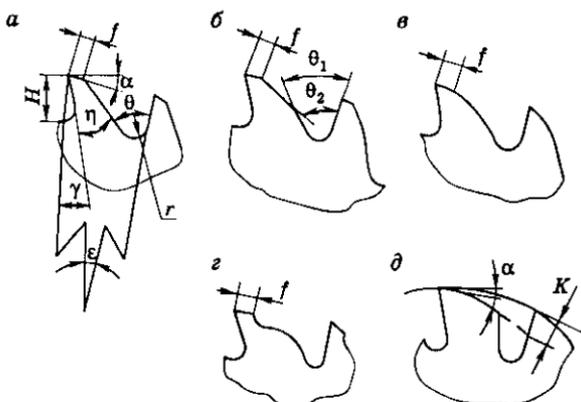


Рис. 4.31. Формы зубьев цилиндрических фрез

Зная θ и ε , определим высоту зуба H :

$$H = \frac{D}{2} [(1 - \cos \varepsilon) + \sin \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \theta].$$

В данной формуле не учтены радиус перехода от спинки к передней поверхности и наличие фаски f , расположенной под углом α , поэтому фактическая величина H будет несколько меньше расчетной.

Как правило, ее определяют из эмпирической зависимости $H = kD/z$, где k — коэффициент высоты зуба, равный: для концевых фрез — 0,9...1,2; для торцовых и цилиндрических с крупными зубьями — 1,2...1,5, с мелкими зубьями — 0,8...0,9; для дисковых двух- и трехсторонних фрез — 1,4...1,8.

Более прочной и распространенной, чем остроконечная, является форма зуба со спинкой, образованной двумя плоскостями (рис. 4.31, б). При этом обычно $\theta_1 = 60^\circ$ и $\theta_2 = 65^\circ$. Изготовление этих зубьев отличается большей трудоемкостью, так как они формируются за две операции или с использованием специальных фрез. Зуб с такой спинкой применяется для цилиндрических и торцовых фрез, в первую очередь твердосплавных.

Параболическая форма зуба (рис. 4.31, в) является равнопрочной на изгиб для всех сечений зуба и обеспечивает достаточно большой объем стружечных канавок. Несмотря на то, что парабола обычно заменяется близкой к ней окружностью, для формирования спинки зуба необходима специально спрофилированная фасонная фреза. При этом даже небольшие погрешности профилирования и установки вызывают резкое увеличение ширины ленточек, а следовательно, условия заточки ухудшаются. Этот недостаток устраняется при использовании выступающей ленточки (рис. 4.31, г). Параболическая форма зуба характерна для зубьев цилиндрической части концевых фрез из быстрорежущих сталей. Для таких зубьев и зубьев насадных цилиндрических фрез используется также форма, приведенная на рис. 4.31, г.

Спинка *затылованных зубьев* (рис. 4.31, д) обычно имеет форму спирали Архимеда, а спад затылка $K = (\pi D \operatorname{tg} \alpha) / z$. Использование затылованных зубьев в случае их переточки по передней поверхности позволяет сохранить профиль, поэтому такие зубья характерны для большинства фасонных фрез. Спинка зуба

и передняя поверхность сопрягаются по радиусу r , который в значительной степени снижает концентрацию напряжений в этой области и влияет на условия размещения стружки в канавке фрезы.

С этой точки зрения радиус можно определить так:

$$r \geq \sqrt{\frac{S_z K_c t}{\pi}} = \sqrt{S_z t},$$

где K_c — коэффициент размещения стружки ($K_c = 3 \dots 4$); t — глубина фрезерования.

Однако из конструктивных соображений $r = (0,4 \dots 0,75)H$.

Различные формы торцовых зубьев фрез приведены на рис. 4.32. У мелких и шпоночных фрез переходный участок от торцевой режущей кромки к цилиндрической заострен (рис. 4.32, а) или скруглен (рис. 4.32, б), для крупных фрез он выполнен в виде фаски с углом 45° и шириной $c = 0,5 \dots 1,5$ мм (рис. 4.32, в), для фасонных фрез имеет радиус R (рис. 4.32, г).

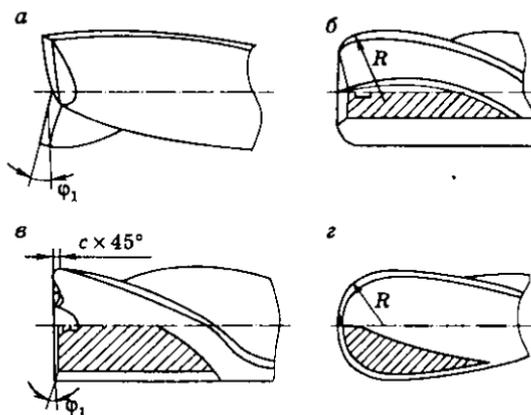


Рис. 4.32. Формы торцовых зубьев фрез

Как уже отмечалось, по расположению относительно оси фрезы бывают с *прямыми*, *винтовыми* и *разнонаправленными* зубьями. Наиболее эффективны фрезы с винтовыми зубьями, однако в этом случае возникает осевая сила P_x , направление которой опреде-

ляется направлениями вращения фрезы и стружечной канавки. Например, фреза может иметь правое направление зубьев и левое вращение (рис. 4.33, а). Осевая сила P_z в этом случае стремится затолкнуть оправку в отверстие шпинделя станка. Указанные направления стружечной канавки и вращения фрезы будут противоположными и благоприятными для процесса резания, так как при этом нет дополнительных нагрузок на элементы крепления фрезы в шпинделе станка.

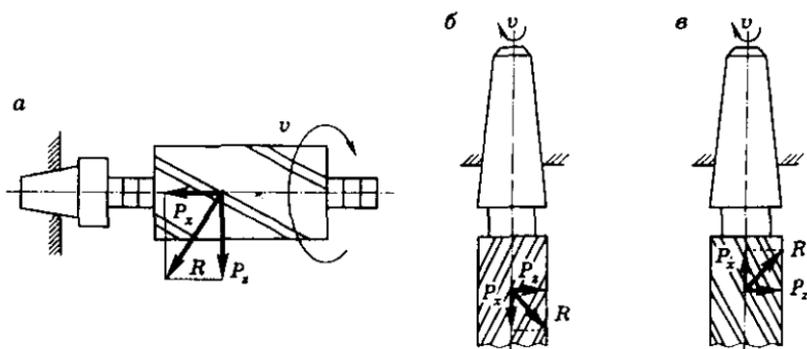


Рис. 4.33. К выбору направления зубьев фрез

В случае крутых винтовых канавок ($\omega = 45 \dots 60^\circ$) на оправке ставят две цилиндрические фрезы с разным их направлением. В этом случае осевые составляющие уничтожают друг друга, но фрезы надо ставить так, чтобы осевые силы сжимали их между собой. Такие фрезы получили название *составных* (см. рис. 4.15, в). На их торцах есть выступы и впадины, обеспечивающие перекрытие режущих лезвий одной фрезы режущими лезвиями другой.

Что касается направления винтовых канавок у концевых фрез, то оно должно совпадать с направлением вращения, хотя при этом осевая составляющая силы резания будет стремиться вытянуть фрезу из шпинделя (рис. 4.33, б). Если же направления не совпадают (рис. 4.33, в), передние углы фрезы будут отрицательными, затрудняется выход стружки, которая направляется в сторону паза и пакетируется, что может привести к поломке фрезы.

4.4.2. Расчет и конструирование острозаточенных фрез

Фрезы состоят из рабочей части, снабженной зубьями с режущими кромками, хвостовика, предназначенного для крепления (у хвостовых фрез), шейки, расположенной между рабочей частью и хвостовиком. Рабочая часть состоит из корпуса и зубьев, которые могут включать крепежные и регулировочные элементы, режущие и опорные пластины и т.д. Корпус насадной фрезы имеет отверстие для крепления на оправке, шпоночный паз служит для передачи крутящего момента.

Диаметр фрезы D определяет количество и форму зубьев, а *диаметр посадочного отверстия, или диаметр оправки, d_o* — диапазон подач и условия теплоотвода. Бóльший диаметр фрезы позволяет:

- сделать при неизменном окружном шаге бóльшее количество зубьев, благодаря чему при одинаковой подаче на зуб минутная подача, а следовательно, и производительность возрастают;
- увеличить массу фрезы и длину дуги контакта фрезы с обрабатываемой деталью, за счет чего улучшается теплоотвод, а значит, увеличивается период стойкости;
- сделать бóльшее посадочное отверстие, т.е. применить более жесткую оправку, позволяющую работать на высоких режимах резания без вибраций.

Однако увеличение диаметра фрезы имеет и недостатки, так как возрастают время на врезание, крутящий момент, как следствие — расход электроэнергии и инструментального материала.

Поэтому конструкцию фрезы стремятся выбрать с наибольшим диаметром посадочного отверстия и возможно меньшим наружным диаметром. Ориентировочно для цилиндрических и дисковых фрез при небольшой ширине фрезерования принимают $D = 10t_{\max}$, где t_{\max} — максимальная глубина фрезерования. Если ширина фрезерования большая, то $D = 20t_{\max}$. Наиболее правильно выбрать вначале диаметр посадочного отверстия, а затем все остальные конструктивные элементы фрезы: $D = d_o + 2m + 2H$, где m — толщина тела фрезы; H — высота зуба (см. рис. 4.15, б).

Диаметр оправки d_o определяется силами, действующими на оправку, с учетом одновременного действия изгиба и кручения.

Расчетная схема представляет собой балку, один конец которой защемлен, а другой лежит на опоре свободно:

$$M_{\text{пр}} = 0,33M_{\text{и}} + 0,65\sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{к}}^2}; \quad M_{\text{к}} = \frac{P_z D}{2}; \quad M_{\text{и}} = \frac{3}{16} \frac{R}{l_0},$$

где $M_{\text{пр}}$ — приведенный момент; $M_{\text{и}}$ — изгибающий момент сил, действующих на оправку; $M_{\text{к}}$ — крутящий момент сил, действующих на оправку; P_z — окружная (главная) сила резания; R — равнодействующая окружной и радиальной сил резания; l_0 — длина оправки.

Зная, что момент сопротивления круглого сечения $W = 0,1d^3$, можем определить диаметр оправки:

$$d = \sqrt[3]{\frac{10M_{\text{пр}}}{[\sigma]_{\text{и}}}},$$

где $[\sigma]_{\text{и}}$ — допустимое напряжение на изгиб, МПа.

На практике диаметр оправки рассчитывается редко, соотношение диаметров оправки d_0 и фрезы D приблизительно равно $D = (2,25 \dots 3)d_0$. Размеры диаметров оправки и фрезы, полученные практическим путем, представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значения диаметров фрез, мм

Вид и тип фрезы	Диаметр оправки, мм							
	13	16	22	27	32	40	50	63
Цельная	30	40	50	63	80	100	—	—
Сборная:								
торцовая	—	—	—	80	100	125	160...250	—
дисковая	—	—	—	100	125	160	200...315	—
цилиндрическая	—	—	—	—	—	100	125...200	250

4.4.3. Расчет и конструирование затылованных фрез

В большинстве случаев фасонные фрезы, которые, как правило, выполняются затылованными, делают насадными. Они должны удовлетворять следующим условиям:

- обладать достаточной прочностью зуба и значительной его толщиной для обеспечения большого числа переточек;
- иметь достаточные размеры канавок между зубьями, чтобы обеспечить размещение стружки и выход затыловочного реза или шлифовального круга при затыловании;
- иметь возможно меньший наружный диаметр, как и фрезы с остроконечным зубом.

Диаметр фрезы (рис. 4.34) рассчитывается так:

$$D = d_o + 2t + 2H,$$

где d_o — диаметр оправки (посадочного отверстия), мм; t — толщина тела фрезы, мм; H — высота зуба фрезы, мм.

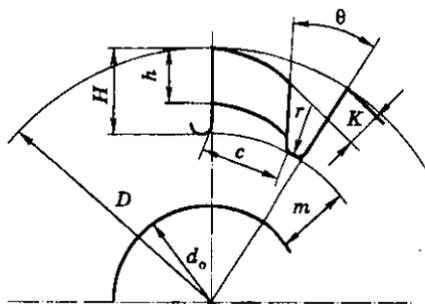


Рис. 4.34. Конструктивные элементы затылованного зуба

Диаметр оправки d_o можно выбрать в зависимости от высоты профиля детали h_d :

h_d , мм	До 5	6...10	11...20	21...30
d_o , мм	22	27	32	40

Величину t можно определить следующим образом:

$$t = (0,3...0,5)d_o,$$

причем чем меньше d_0 , тем большее значение коэффициента при нем следует брать, т.е. тем больше будет m .

Значение *высоты зуба фрезы* H можно определить, зная величины h , K и r :

$$H = h + K + r,$$

где $h = h_d + (1...3)$ мм; K — спад затылка ($K = (\pi D/z) \operatorname{tg} \alpha$); $r = 1...5$ мм.

Диаметр фрезы обычно определяют из соотношения $D = 2,5d_0$.

Зная диаметр фрезы, рассчитывают число зубьев:

$$z = \pi D / S_{\text{окр}},$$

где $S_{\text{окр}}$ — окружной шаг зубьев ($S_{\text{окр}} = Ah$, где A — постоянный коэффициент: для черновых фрез $A = 1,8...2,5$, для чистовых — $1,3...1,8$).

В общем случае последовательность определения конструктивных элементов фрезы с затылованным зубом сводится к определению D , d_0 , z , расчету величины H , вычерчиванию и окончательному уточнению размеров фрезы.

Для фасонных фрез характерно следующее: при большем диаметре фрезы необходимо выбирать меньшее число зубьев. Это объясняется тем, что с увеличением D возрастает величина K , а значит, и общая высота зуба. В результате зуб будет тонкий, нежесткий. Если сделать зуб толще, K еще больше возрастет, а следовательно, еще больше увеличится H . Установлено, что толщина зуба s должна быть равна $(0,8...1)H$, а угол канавки θ — в пределах $18...30^\circ$ (см. рис. 4.34). С целью упрощения измерения наружных диаметров при изготовлении фрезы число зубьев должно быть четным.

К задней поверхности зуба фрезы предъявляются следующие требования:

- обеспечение постоянства профиля, т.е. неизменности высоты профиля в любом радиальном сечении при условии, что переточка производится по передней поверхности;

- обеспечение постоянства заднего угла в любой точке задней поверхности;

- простота затылования.

Условию обеспечения постоянства профиля и угла α затылованного зуба в любом сечении (1-1 или 2-2) удовлетворяет только логарифмическая спираль, описываемая уравнением $\rho = ae^{m\theta}$,

где ρ — радиус-вектор; a , m — константы; θ — полярный угол (рис. 4.35, а). В этом случае $\operatorname{tg} \alpha = d\rho/\rho = \operatorname{const}$. Однако из практических соображений (проще изготовить кулачки для затылования) вместо логарифмической используют архимедову спираль $\rho = b\theta$, где b — константа (рис. 4.35, б). При угле $\theta = 2\pi$ имеем $\rho = a$. Тогда $b = a/(2\pi)$ и уравнение спирали приводится к виду $\rho = a\theta/(2\pi)$.

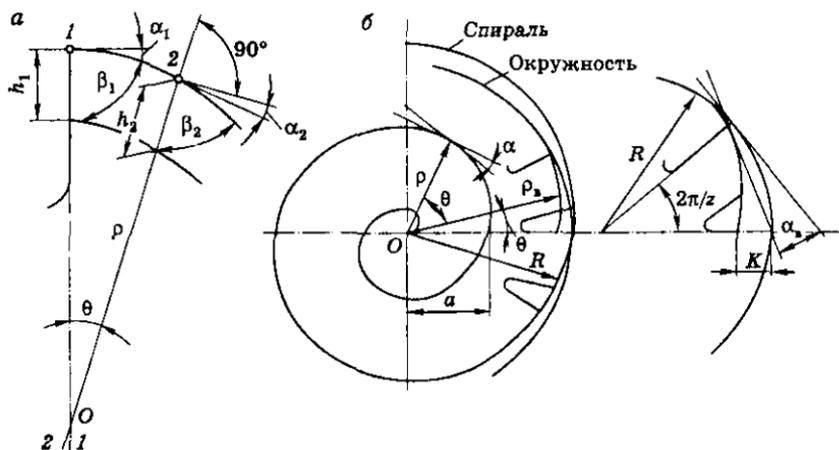


Рис. 4.35. Схемы затылования зуба по логарифмической (а) и архимедовой спиралям (б)

Задний угол в различных сечениях зависит от угла θ , но в пределах ширины зуба его изменение не превышает 2° . Закон движения прост и легко осуществим на токарном и другом оборудовании: точка равномерно (с постоянной скоростью) движется по радиусу-вектору, который вращается с постоянной угловой скоростью (рис. 4.36).

Величина подъема спирали $a = Kz$, где K — подъем спирали, соответствующий шагу зубьев, или величина затылования (см. рис. 4.35, б). Тогда $\operatorname{tg} \alpha = Kz/(2\pi\rho)$ и, принимая радиус вершины $\rho_v = R$, получим $\operatorname{tg} \alpha_v = Kz/(2\pi R)$, откуда $K = (\pi D/z)\operatorname{tg} \alpha_v$, где R , D — соответственно радиус и диаметр фрезы; α_v — задний угол на вершине зуба фрезы.

Известно, что для кулачка, предназначенного для затылования по архимедовой спирали, величина спада за один оборот равна

величине затылования. Кулачок, рассчитанный для определенного значения заднего угла, можно использовать при любом числе зубьев и диаметре затылуемой фрезы.

При шлифованном профиле зуба применяют двойное затылование, причем для выхода шлифовального круга задняя нешлифованная часть затылуется с помощью кулачка со спадом профиля $K_1 = (1,5 \dots 1,75)K$ (рис. 4.36, б).

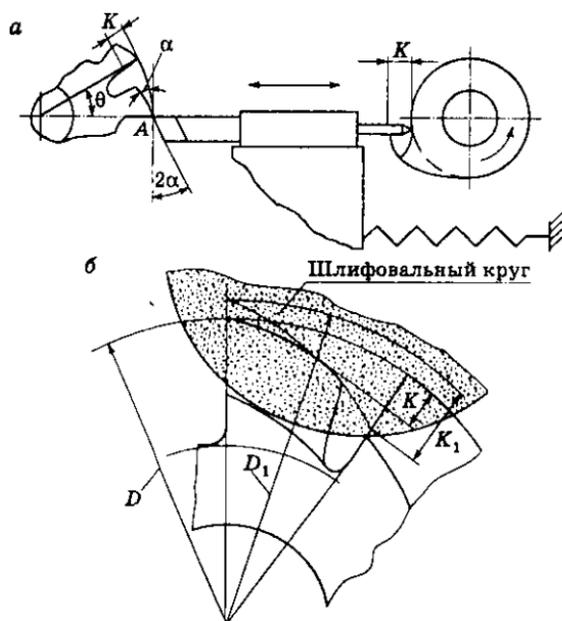


Рис. 4.36. Схемы затылования зуба токарным резцом (а) и шлифовальным кругом (б)

Форма профиля фасонной фрезы в значительной степени определяет выбор заднего угла. Задний угол на боковых сторонах профиля α_6 тем меньше, чем больше режущая кромка отклоняется от линии, параллельной оси фрезы, т.е. чем меньше главный угол в плане точки, лежащей на вершине фрезы:

$$\operatorname{tg} \alpha_6 = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi,$$

где α — задний угол фрезы в сечении, перпендикулярном к оси; φ — угол между режущей кромкой и этим сечением.

На практике выбирают значение заднего угла в пределах $8...15^\circ$.

Чтобы увеличить угол φ , а следовательно, и угол α , фрезерование открытых профилей производят при наклонном положении оси детали относительно оси фрезы. Фрезы, предназначенные для обработки закрытых фасонных профилей, можно изготавливать с использованием углового затылования (рис. 4.37). В этом случае перемещение резца под углом τ обеспечивается разворотом суппорта. При этом величина затылования K_τ равна

$$K_\tau = \frac{K \sin \varphi}{\sin(\varphi + \tau)},$$

где K — величина затылования в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы.

Обычно принимают $\tau = 3...6^\circ$.

Передний угол фасонных фрез обычно равен нулю, однако период стойкости, а следовательно, и производительность в этом случае ниже, чем у фрез с положительным передним углом. При наличии переднего угла высота профиля фрезы не соответствует высоте профиля детали, и необходимо выполнять специальный коррекционный расчет. Если точность обрабатываемой детали невелика, допускается применение фрез с $\gamma = 5^\circ$ без проведения коррекционного расчета.

Коррекционный расчет фрезы позволяет определить размеры ее профиля в радиальном сечении.

Рассмотрим его методику на примере фрезы с трапецидальным профилем. Пусть C — конечная точка профиля на зубе фрезы (рис. 4.38). Если переместить эту точку по дуге с радиусом $B = OC$ в точку C_1 на вертикальную ось фрезы OA , то отрезок AC даст высоту профиля детали h_d . Но эта высота не равна соответствующему отрезку профиля фрезы AC_2 , если измерять ее в радиальной плоскости OA , так как профильная поверхность зуба очерчена не по окружности, а по спирали Архимеда.

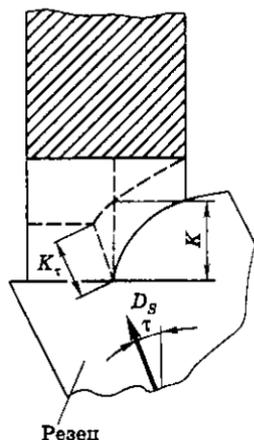


Рис. 4.37. Схема углового затылования

Высоту профиля на фрезе получим, если перенесем точку C по спирали в точку C_2 . Отрезок AC_2 будет равен высоте профиля фрезы h_{ϕ} . Как видно из рисунка, h_{ϕ} меньше h_x на величину Δh , поэтому профиль затыловочного резца, применяемого для изготовления фрезы, должен быть соответствующим образом скорректирован.

Задача сводится к нахождению величины $\Delta h - h_{\text{из}} = h_{\phi}$. Для этого рассматривают криволинейные треугольники AA_1A_2 и $AA'A''$. Из подобия этих треугольников можно записать, что $\Delta h/K = \psi/z$, откуда $\Delta h = K\psi/\epsilon$, где $\epsilon = 360^\circ/z$. Тогда

$$\Delta h = \frac{Kz\psi}{360^\circ},$$

где K — величина затылования.

В этой формуле неизвестен только угол ψ . Для его определения продолжим след передней поверхности зуба фрезы вправо от точки A и из центра фрезы O опустим на него перпендикуляр. Далее рассмотрим треугольник AOC , для которого можно записать $\beta = \gamma + \psi$, где β — внешний угол треугольника AOC . Тогда

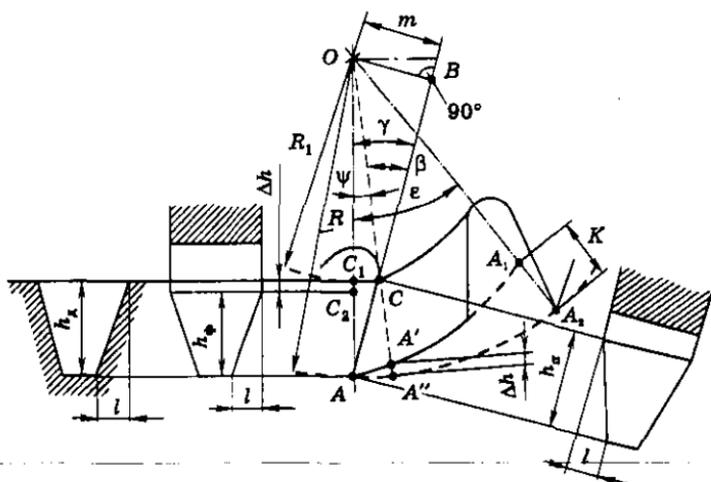


Рис. 4.38. Схема коррекционного расчета профиля фасонной фрезы с затылованным зубом при $\gamma \neq 0$

$\psi = \beta - \gamma$. Из треугольника OCB угол $\beta = \arcsin(m/R_1)$, где $R_1 = R - h_d$. В свою очередь, из треугольника OBA получим $m = R \sin \gamma$, где R — максимальный радиус профиля фрезы.

Такие расчеты выполняются для всех узловых точек профиля фрезы, изменяя значение h_d для каждой из них. Размеры l , параллельные оси фрезы, не искажаются.

4.5. Расчет режимов резания при фрезеровании

Режимы резания при фрезеровании определяются в той же последовательности, что при других видах обработки.

1. Прежде всего выбирают инструментальный материал, конструкцию фрезы и геометрические параметры ее режущей части. Материал режущей части выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, состояния поверхности заготовки, условий резания (общие рекомендации по выбору инструментальных материалов приведены в гл. 1). Геометрические параметры фрезы назначаются в зависимости от свойств обрабатываемого материала, жесткости технологической системы, вида обработки (черновая, чистовая или отделочная) и других условий резания.

2. Глубина резания назначается в зависимости от припуска на обработку h . Припуск целесообразно снимать за один проход, т.е. глубина резания $t = h$. При повышенных требованиях к точности и шероховатости обработанной поверхности припуск снимается в два прохода: черновой и чистовой ($t = 0,75 \dots 2$ мм).

3. Основными факторами, ограничивающими выбор максимально возможной величины подачи при черновом фрезеровании, являются свойства обрабатываемого материала, прочность материала режущей части фрезы, жесткость технологической системы, размеры обработки, прочность механизма подачи станка.

При получистовом и чистовом фрезеровании основным ограничивающим фактором величины подачи является шероховатость обработанной поверхности.

При черновой обработке с целью повышения производительности необходимо назначать наиболее прочный твердый сплав, т.е. сплав, допускающий наибольшую подачу S_z . Если же по условиям работы достаточно прочными окажутся несколько марок твердых сплавов (например, при чистовой обработке, когда S_z должна быть относительно мала), то необходимо выбрать твердый сплав, допускающий наибольшую скорость резания.

Подача S_z , исходя из достаточной прочности твердосплавной пластины, может быть увеличена в 1,8–2 раза, если обеспечить наивыгоднейшие условия врезания зубьев торцовой фрезы в заготовку. К ним относятся: 1) удаление места первоначального удара зуба о заготовку в более прочное место пластины; 2) уменьшение толщины среза (площади поперечного сечения среза), приводящее к уменьшению силы удара.

На соблюдение этих условий влияют как геометрические элементы режущей части зуба, так и соответствующая установка фрезы по отношению к заготовке. Установка фрезы по отношению к заготовке зависит от диаметра фрезы D и ширины заготовки B . При обработке конструкционных углеродистых, легированных сталей и чугуна, когда $D/B = 1,1 \dots 1,7$, рекомендуется устанавливать фрезу так, чтобы траектория движения режущих кромок ее зубьев по отношению к заготовке (со стороны входа зуба фрезы в заготовку) выступала на величину $(0,03 \dots 0,05)D$. Это, наряду с повышением стойкости фрезы, способствует уменьшению вибраций и получению меньшей шероховатости обработанной поверхности.

Рекомендуемые подачи S_z , мм/зуб, приводятся в справочниках по режимам резания.

4. После назначения глубины резания и подачи при выбранной стойкости фрезы подсчитывается скорость резания, допускаемая ее режущими свойствами (см. п. 4.1.4, 4.2.4).

5. По найденной скорости резания подсчитывается необходимая частота вращения n шпинделя станка. Найденная частота корректируется по кинематическим данным станка и затем подсчитывается действительная скорость резания.

6. Минутная подача определяется из уравнения $S_m = S_z z n$, где z — число зубьев фрезы, n — частота ее вращения, об/мин.

Найденное значение S_m корректируется по паспортным данным станка и затем подсчитывается действительная подача на зуб:

$$S_{zd} = \frac{S_{мд}}{zn_d}$$

7. Подсчитывается мощность резания и определяется достаточность мощности электродвигателя главного движения станка (см. § 2.12).

При тяжелых условиях резания определяется сила подачи P_h и проверяется прочность механизма подачи станка (сила P_h должна быть меньше или, в крайнем случае, равна максимальному усилию, допускаемому механизмом подачи станка).

8. Основное время каждого прохода при фрезеровании подсчитывается по формуле

$$T_o = \frac{L}{S_m} = \frac{l + l_1 + l_2}{S_m},$$

где L — длина рабочего хода, мм; S_m — минутная подача, мм/мин; l — длина обрабатываемой поверхности; l_1, l_2 — длины соответственно врезания и перебега.

Если фрезерование осуществляется за несколько проходов, то общее основное время технологического перехода равно $\Sigma T_o = T_o h/t$, где h — припуск на обработку; t — глубина фрезерования.

Величины врезания и перебега можно определять по таблицам справочников или используя следующие зависимости:

- при фрезеровании цилиндрической или дисковой фрезой

$$l_1 = \sqrt{t(D-t)} + (1...3) \text{ мм}; l_2 = 2...5 \text{ мм};$$

- фрезеровании торцовом асимметричном

$$l_1 = \sqrt{B(D-B)} + (1...3) \text{ мм}; l_2 = 1...6 \text{ мм};$$

- фрезеровании торцовом симметричном при $\varphi = 90^\circ$

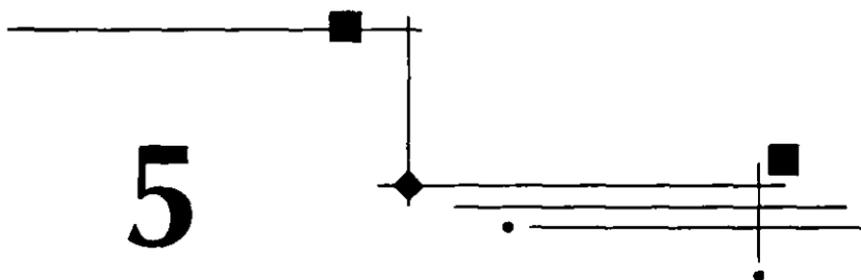
$$l_1 = 0,5(D - \sqrt{D^2 - B^2}) + (1...3) \text{ мм};$$

- фрезеровании торцовом симметричном при $\varphi \neq 90^\circ$

$$l_1 = 0,5(D - \sqrt{D^2 - B^2}) + \frac{t}{\operatorname{tg}\varphi} + (1...3) \text{ мм}.$$

Здесь t — глубина фрезерования; φ — главный угол фрезы в плане.

5



ПРОТЯГИВАНИЕ

5.1. Процесс протягивания



5.1.1. Назначение и конструктивные элементы протяжек и прошивок

В технологии машиностроения различают операции протягивания и прошивания, выполняемые соответственно протяжками и прошивками. *Протяжка* имеет хвостовик для крепления ее в патроне, относительно большую длину и работает на растяжение, а *прошивка* не имеет хвостовика и шейки и работает на сжатие и продольный изгиб.

Обработка поверхностей протягиванием производится как на обычных универсальных горизонтально- и вертикально-протяжных станках, так и на специализированных, например для непрерывного протягивания. Протягиванием могут обрабатываться поверхности деталей, расположенные как свободно, так и с необходимой точностью относительно базовых поверхностей. В соответствии с этим различают два основных способа протягивания — свободное и координатное. При *свободном протягивании* в процессе обработки деталь жестко не фиксируется относительно базовых поверхностей. Центрирование и направление детали осуществляется за счет равновесия сил резания, что обеспечивает

только точность контура обработанной поверхности и его размеры. *Координатное протягивание* осуществляется с использованием специальных приспособлений, которые дают точное взаимное расположение протяжки и обрабатываемого изделия, обеспечивая не только заданную форму и размеры обработанных поверхностей, но и их точное (до 0,02...0,03 мм) расположение относительно базовых поверхностей.

В настоящее время протяжки широко используются в массовом и серийном производстве при обработке сквозных отверстий и наружных поверхностей различной формы. Это позволяет наряду с высокой производительностью сравнительно легко достигать квалитетов точности 6–8 и шероховатости обработанной поверхности до $Ra = 0,63$ мкм.

Протяжки бывают двух видов: *внутренние* (для обработки отверстий) и *наружные* (для обработки незамкнутых, или открытых, наружных поверхностей).

Окончательное формирование протянутой поверхности производится путем срезания стружки или методом пластической деформации, т.е. протяжки могут иметь, кроме режущих и калибрующих, также выглаживающие зубья. Режущими зубьями срезается слой металла, а выглаживающими или деформирующими выглаживается и уплотняется поверхностный слой металла для получения малой шероховатости обработанной поверхности (до $Ra = 0,32$ мкм).

Во время стружкообразования при протягивании имеют место все явления процесса резания: деформации, тепловыделение, наростообразование, трение и износ протяжки. Процесс резания при протягивании осуществляется часто с очень тонкими стружками, особенно при внутреннем протягивании, когда подача на зуб может уменьшаться до 0,015 мм. При обработке сталей получается сильно деформированная сливная стружка, при обработке чугунов — стружка надлома.

При протягивании сталей образуется нарост. Чем больше толщина среза, меньше передний угол зуба протяжки и больше радиус округления режущей кромки, тем больше нарост. Нарост часто сходит под заднюю поверхность зуба протяжки и резко ухудшает шероховатость обработанной поверхности.

Для процесса протягивания характерна прерывистость работы режущих лезвий инструмента. Они находятся в контакте с обра-

батываемым изделием сравнительно непродолжительное время, а при обратном ходе протяжка как бы «отдыхает»; врезание зубьев происходит с ударом, т.е. инструмент испытывает динамические нагрузки. Кроме того, обработка осуществляется со сравнительно малыми толщинами среза, когда большое влияние на процесс срезания слоя металла оказывает радиус округления режущего лезвия. Процесс протягивания чаще всего производится с обильным охлаждением. Принципиальная кинематическая схема протягивания базируется на прямолинейном движении, совершаемом чаще всего протяжкой, режет деталью. Это движение и определяет скорость резания. Движение подачи, без которого невозможно срезание припуска, заложено в конструкции рабочей части протяжки. Благодаря подъему каждого последующего зуба (или группы зубьев) над предыдущим(-и) происходит снятие слоя толщиной a , которая соответствует подаче на зуб протяжки S_z или подаче на группу (секцию) зубьев S .

Наиболее широкое распространение в металлообрабатывающей промышленности получили *протяжки, работающие по групповой схеме резания* (см. п. 5.1.2). Рассмотрим конструктивные элементы и геометрические параметры таких протяжек на примере круглой протяжки переменного резания (рис. 5.1).

Протяжка состоит из рабочей и соединительной частей. Последняя включает хвостовик 1, шейку 2, переходной конус 3 и переднюю направляющую часть 4. Хвостовик служит для закрепления протяжки на станке. Хвостовики бывают разной формы. Передняя направляющая часть обеспечивает центрирование и направление протяжки при вхождении режущих зубьев в контакт с обрабатываемой заготовкой. Ее длина $l_{п.н}$ для протяжки среднего размера в 2,5 раза больше ее диаметра и должна быть не меньше $l + 0,5t_p$, где l — длина протягиваемого отверстия, мм; t_p — шаг режущих зубьев, мм.

Форма передней направляющей в поперечном сечении соответствует форме отверстия до протягивания. Размеры ее устанавливаются исходя из требований посадок $H7/f7$, $H7/e7$, т.е. с гарантированным зазором направляющей части в протягиваемом отверстии.

Рабочая часть протяжки включает режущие, а иногда и выглаживающие зубья. Режущая часть состоит из черновых, пере-

ходных, чистовых и калибрующих зубьев. Черновыми зубьями срезается основная часть припуска под протягивание. Чистовыми зубьями срезаются более тонкие стружки, чтобы уменьшить неровности на обработанной поверхности.

Для обеспечения плавности работы при переходе от черновых к чистовым зубьям групповые протяжки имеют две-три пары переходных зубьев с постепенно уменьшающимися подъемами на зуб от $0,3...0,1$ до $0,05...0,03$ мм.

Задняя направляющая часть 5 протяжки (см. рис. 5.1) предназначена для направления и центрирования детали в момент окончания процесса протягивания. Чаще всего форма задней направляющей части соответствует форме протянутого отверстия. Она выполняется по размерам, обеспечивающим гарантированный зазор между протянутым отверстием и задней направляющей протяжки. Для поддержания протяжки при установке на станке и для возвращения ее в условиях автоматизированного производства после рабочего хода в первоначальное положение применяется цапфа 6, или задний хвостовик, по конструкции аналогичный переднему (рабочему). Передний и задний хвостовики с целью экономии инструментального материала выполняются из конструкционных сталей и привариваются либо крепятся другими способами к рабочей части протяжки.

Величина переднего угла $\gamma = -5...25^\circ$ устанавливается, как и для других режущих инструментов, в зависимости от свойств обрабатываемого материала и материала инструмента. Увеличение переднего угла зубьев быстрорежущих протяжек с 5 до 15° позволяет повысить их период стойкости на $20...25\%$ и оказывает влияние на радиус кривизны образуемых при резании стружечных валиков, размещаемых в стружечных канавках протяжки. Чтобы исключить самозатягивание наружных односторонних шпоночных протяжек в обрабатываемый материал, их передние углы должны быть не более 15° . С целью упрочнения зубьев твердосплавных протяжек передние углы γ следует уменьшать до $0...-5^\circ$ или делать на зубьях фаску с $\gamma_f < 0$.

Наоборот, задние углы зубьев внутренних протяжек выбираются с учетом необходимости сохранения рабочих размеров зубьев при их перетачивании, поэтому для таких протяжек задние углы на черновых и других режущих зубьях $\alpha_{\text{ч}} = 3...4^\circ$, а на ка-

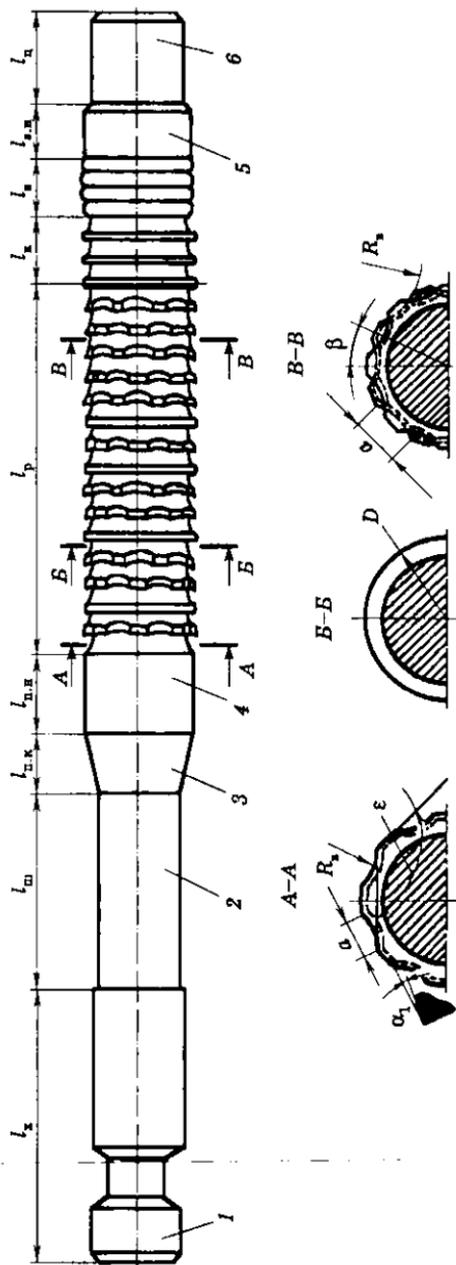


Рис. 5.1. Круглая протяжка групповой схемы резания:

l_x — длина хвостовика; $l_{\text{ш}}$ — длина шейки; $l_{\text{п.к}}$ — длина переходного конуса; $l_{\text{п.н}}$, $l_{\text{п}}$, $l_{\text{ц}}$ — длина соответственно передней и задней направляющих; l_p , l_k , l_n — длина соответственно режущей, калибрующей и выглаживающей частей; $l_{\text{ц}}$ — длина цапфы

либрующих $\alpha_k = 30' \dots 1^\circ 30'$. Для повышения стойкости наружных протяжек, установка которых на определенный размер может легко регулироваться, задние углы зубьев увеличивают до $6 \dots 10^\circ$. Для уменьшения сил трения задней поверхности зуба об обработанную поверхность детали зубья следует остро затачивать. Однако для сохранения размеров зубьев после заточки необходимо оставлять фаску шириной не более $0,02 \dots 0,03$ мм. На калибрующих зубьях величина фаски не должна превышать $0,2$ мм.

5.1.2. Схемы резания при протягивании

Конструкция рабочей части протяжки, ее работоспособность, размеры срезаемых слоев материала зависят от принятой схемы резания. Под *схемой резания* понимают картину последовательного срезания припуска режущими зубьями протяжки.

В зависимости от условий профилирования обработанной поверхности различают профильную и генераторную схемы резания. *Профильная схема резания* (рис. 5.2, а) характеризуется тем, что зубья имеют форму, подобную форме окончательно обработанной поверхности (в данном случае полукруглую), но размер их постепенно увеличивается от первого к последнему режущему зубу на величину подъема зубьев S_2 . Слой материала, срезаемый режущим лезвием (на рисунке заштрихован), имеет дуговую форму с шириной b , равной рабочей длине лезвия, и толщиной $a = S_2$. Протягиваемый контур окончательно формируется режущими кромками последнего зуба.

Генераторная схема резания (рис. 5.2, б) отличается тем, что главные режущие кромки зубьев протяжки mq и nr имеют наиболее простую форму (в данном случае прямолинейные), а вспомогательные режущие кромки nt и pq по форме соответствуют окончательно обработанной поверхности или ее части. Поэтому обработанная поверхность формируется как главными, так и вспомогательными режущими кромками всех режущих зубьев протяжки. Сечение материала, снимаемого i -м зубом протяжки (на рисунке заштрихован), при прямолинейной главной режущей кромке представляет собой полосу шириной b , равной длине главной режущей кромки, и толщиной, равной подъему зубьев

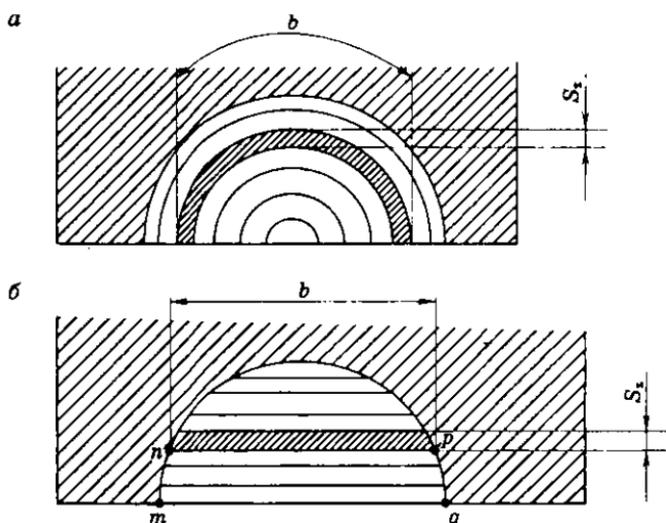


Рис. 5.2. Профильная (а) и генераторная (б) схемы резания полукруглой протяжки

протяжки. Для разделения стружки лезвие протяжек профильной и генераторной схем резания имеет стружкоразделительные канавки с $\alpha_1 = 0$ и $\epsilon = 90^\circ$ (рис. 5.3, а).

Протяжки, спроектированные по профильной схеме резания, называют профильными, а по генераторной схеме — генераторными. Каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки. Поверхности, обработанные профильными протяжками, имеют более высокую точность и низкую шероховатость, поскольку профильные протяжки в любой точке главной режущей кромки имеют одинаковые задние углы. Генераторные протяжки на вспомогательных поверхностях не имеют задних углов, что повышает трение между протяжкой и деталью и способствует образованию задиrow на обработанной поверхности.

Профильные протяжки для обработки сложных контуров более трудоемки в изготовлении, так как для их заточки требуются специальные копирные устройства. Для генераторных протяжек заточка главных задних поверхностей углового лезвия вне зависимости от его формы осуществляется на плоско- или круглошлифовальных станках.

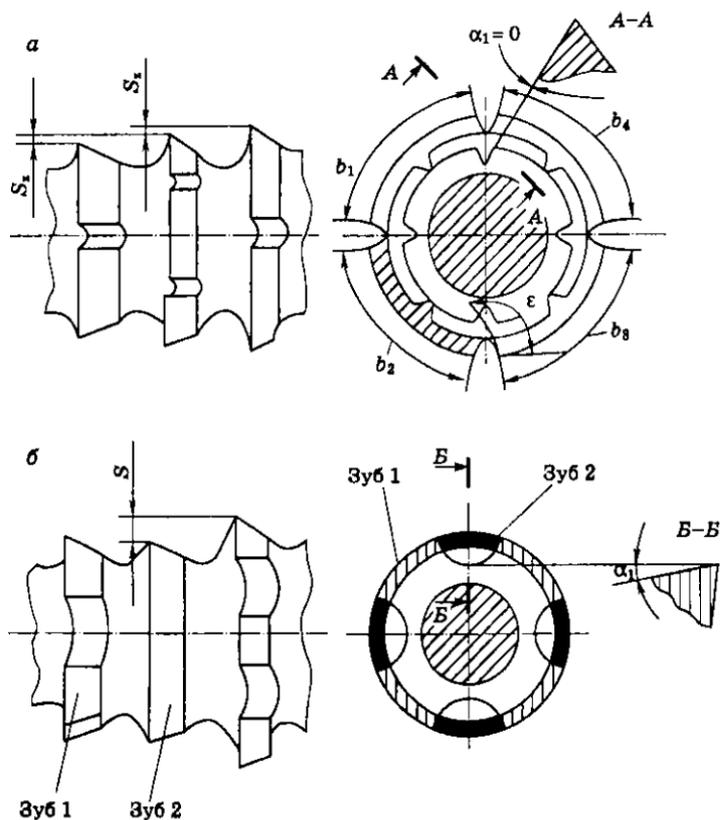


Рис. 5.3. Одинарная (а) и групповая (б) схемы резания круглой протяжки

Наиболее широкое распространение получили протяжки переменного резания, которые не имеют недостатков профильных и генераторных протяжек.

В зависимости от условий резания каждого слоя припуска различают одинарную и групповую схемы резания. При *одинарной схеме резания* (рис. 5.3, а) каждый зуб протяжки срезает слой припуска по всему периметру обрабатываемой поверхности. При *групповой схеме резания* (рис. 5.3, б) каждый слой припуска срезается не одним зубом, а группой из двух—пяти зубьев.

Рассмотрим простейший случай, когда секция протяжки групповой схемы резания состоит из двух лезвий. Первое лезвие секции называют прорезным (зуб 1), а второе — зачистным (зуб 2). Окружность прорезного лезвия разделена на несколько равных частей дуговыми выкружками, длина дуг выкружек равна половине длины окружности этого лезвия. В таких условиях срезается слой материала удвоенной толщины и с суммарной шириной, равной половине общей длины режущей кромки (площадь слоя, срезаемого зубом 1, заштрихована). Зачистное лезвие выкружек не имеет и его работа сводится к снятию слоя металла, который не срезало первое лезвие (на рисунке зачернен).

Диаметр зачистного лезвия на 0,02...0,04 мм меньше, чем прорезного, во избежание получения непрерывной стружки. Тонкие участки такой стружки могут образовываться в результате срезания упруго восстановленного металла после прохождения прорезного лезвия.

Если в группе будет три или четыре лезвия, то соответственно первые два или три будут прорезными с шахматным расположением выкружек, а последнее — зачистным, без выкружек и меньшего диаметра, чем прорезные.

Аналогично происходит снятие припуска прорезными и зачистными лезвиями плоских протяжек групповой схемы резания.

Калибрующие лезвия протяжек предназначены для окончательного формирования размеров и формы обработанной поверхности с определенной высотой микронеровностей и служат резервом режущих лезвий при переточках. Если взять, например, круглую протяжку любой схемы резания, ни в конструктивных элементах, ни в геометрических параметрах калибрующих и режущих лезвий разницы нет. Существует несколько вариантов групповой схемы резания, которые подробно рассмотрены в литературе. В целом все они имеют ряд достоинств, повышающих эффективность протягивания за счет:

- 1) увеличения подъема на секцию до 0,3...1,0 мм, способствующего уменьшению длины протяжек и увеличению периода их стойкости. Увеличение стойкости протяжек групповой схемы по сравнению с протяжками профильной и генераторной схем резания объясняется меньшим влиянием наклепанного слоя (образуется после прохождения каждого лезвия) на работу после-

дующих лезвий, так как они работают не по упрочненному слою металла, а под ним. Кроме того, наличие положительных значений углов $\alpha_1 = 3...4^\circ$ на стружкоразделительных канавках (см. рис. 5.1 и 5.3, б) способствует увеличению периода стойкости протяжек из-за уменьшения сил трения и количества выделившейся теплоты, которая при значениях углов $\epsilon > 120^\circ$ лучше отводится из зоны резания;

2) уменьшения снимаемой каждым лезвием суммарной ширины среза, что способствует снижению сил резания, несмотря на одновременное увеличение толщины среза. Следует учесть, что срезаемая стружка не имеет «ребер жесткости», формируемых стружкоразделительными канавками, и на ее сворачивание в завитки требуется меньшее усилие.

5.2. Разновидности протяжек

Выше отмечалось, что протяжки используются для обработки внутренних и наружных поверхностей самой разнообразной формы. При этом может выполняться как срезание соответствующего припуска, так и выглаживание предварительно обработанной поверхности с целью изменения ее шероховатости и свойств поверхностного слоя.

Конструктивные элементы выглаживающих быстрорежущих и твердосплавных зубьев и их виды показаны на рис. 5.4, а.

При обработке особо точных отверстий обычными протяжками происходит потеря номинального размера уже после нескольких переточек. Поэтому целесообразно делать калибрующую часть регулируемой по диаметру (рис. 5.4, б). Пустотелая втулочная секция 1 имеет по всей длине спиральную сквозную прорезь. Под воздействием гайки 3 перемещается втулка 2 и секция 1 с коническим отверстием. В связи с этим увеличивается ее наружный диаметр (максимум на 0,2 мм), что значительно продлевает срок службы протяжки.

Широкое распространение получили протяжки для обработки шлицевых отверстий с прямобочным и эвольвентным профилем.

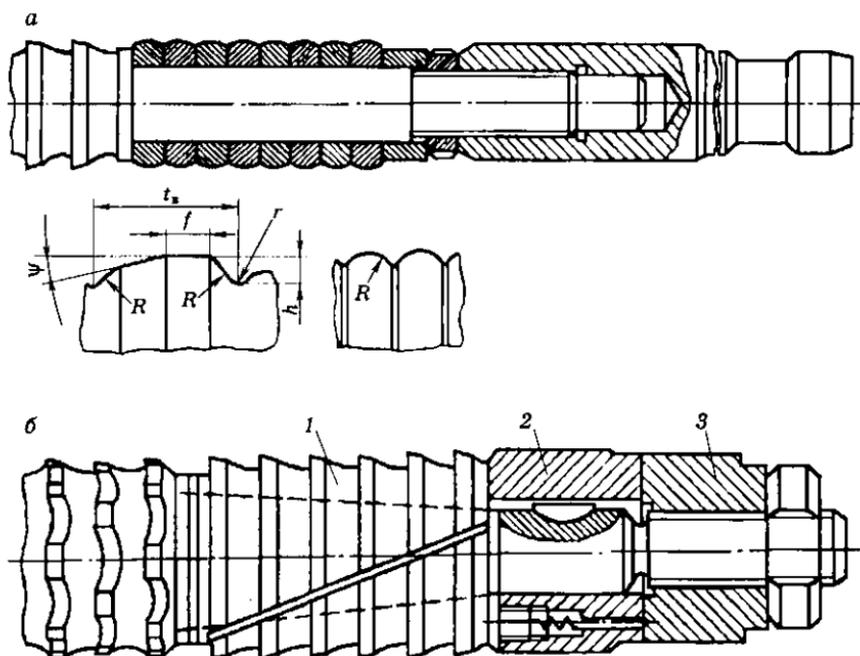


Рис. 5.4. Протяжки с выглаживающими (а) и регулирующими (б) зубьями

Шлицевые протяжки чаще всего выполняются по генераторной одинарной или групповой схеме резания. У протяжек *генераторной одинарной схемы резания* для обработки прямобочных шлицев (рис. 5.5, а) подъем осуществляется на каждый зуб, но редко превышает 0,05 мм. Поэтому для обработки отверстий чаще всего применяется комплект из двух-трех и более протяжек. Для уменьшения трения на боковых сторонах зубьев создается поднутрение с $\varphi_1 = 1...1^{\circ}30'$. Оно начинается не с вершины шлицевого зуба, а на расстоянии $f = 0,7...1,0$ мм от его вершины, что также способствует менее интенсивному износу уголков зубьев. У основания шлицевых выступов протяжки для выхода шлифовального круга делают продольные канавки глубиной 0,8...1,0 мм и углом профиля $50...60^{\circ}$ (рис. 5.5, б).

Более широкое применение при обработке шлицевых отверстий имеют протяжки *групповой схемы резания* (см. рис. 5.5, б

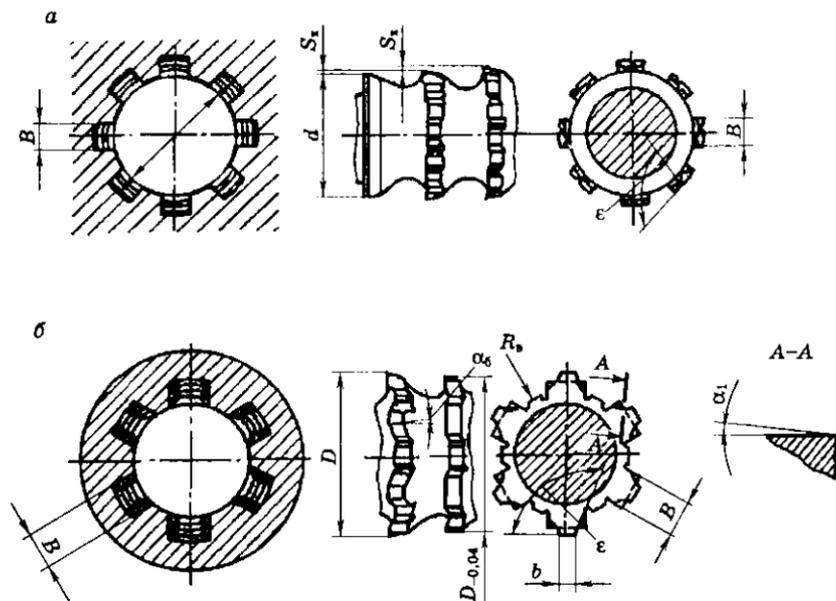


Рис. 5.5. Образование прямоугольных шлицев зубьями протяжек одинарной (а) и групповой (б) схем резания

и рис. 5.6), у которых срезание отдельных слоев металла в шлицевых пазах производится секцией из двух зубьев. Первый (прорезной) зуб снабжен боковыми скосами-фасками, благодаря чему он срезает более узкую стружку шириной 0,6...0,7 от ширины шлица, если последняя превышает 10 мм. Второй (зачистной) зуб имеет режущую кромку полной ширины и срезает две стружки с краев канавки, которые сходят в сторону от стенок шлицевой канавки и не царапают их. Во избежание срезания стружки по всей длине зачистной зуб выполняется на 0,015...0,02 мм ниже первого.

Шлицевые зубья разделяются на черновые, переходные, чистовые, калибрующие. Черновые зубья имеют подъем на секцию до 0,2...0,3 мм, переходные — постепенно снижающийся до 0,02...0,03 мм, чистовые — весьма небольшой — 0,015...0,02 мм. При этом черновые и переходные зубья делают секционными всегда, а чистовые — только при большой ширине шлица.

В зависимости от последовательности расположения фасочной, цилиндрической и шлицевой частей изменяются длина, техно-

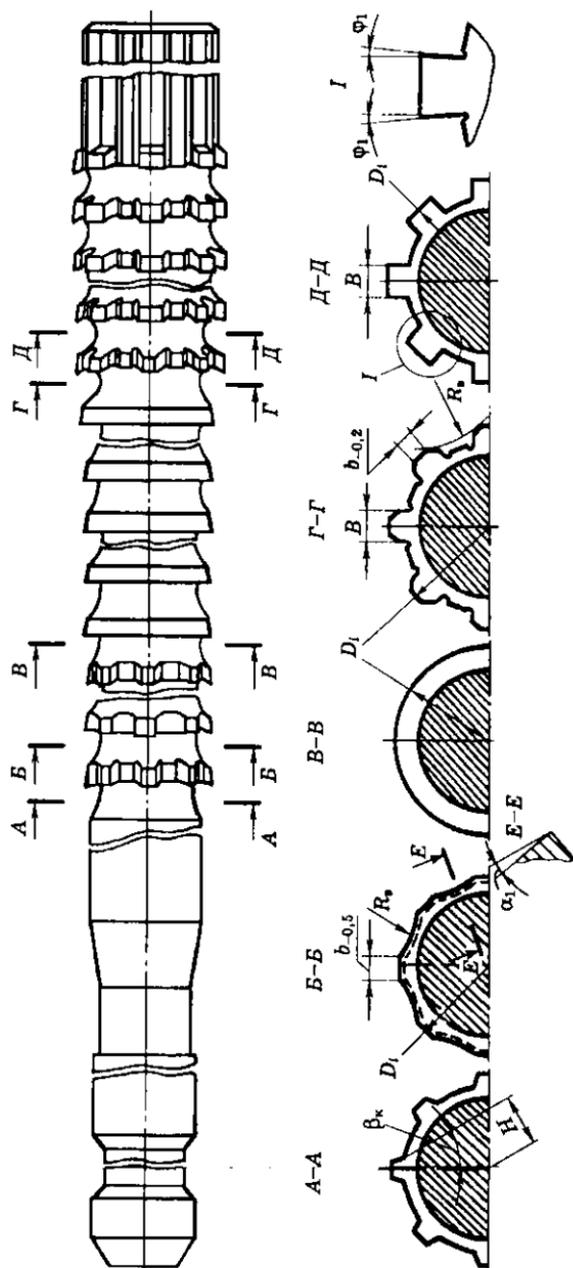


Рис. 5.6. Комбинированная шлицевая протяжка групповой схемы резания

логичность и эксплуатационные свойства протяжек. Различают следующие комбинации размещения частей на этих протяжках: 1) цилиндрическая + шлицевая; 2) цилиндрическая + шлицевая + фасочная; 3) шлицевая + цилиндрическая; 4) фасочная + шлицевая + цилиндрическая; 5) фасочная + цилиндрическая + шлицевая (см. рис. 5.6). Наиболее распространенной является пятая комбинация, так как такие протяжки имеют небольшую длину, а также технологичнее в изготовлении и эксплуатации. Однако их следует применять, когда длина протягиваемой поверхности больше длины калибрующей части цилиндрических зубьев, т.е. не менее 45...50 мм.

Комбинированные эвольвентные шлицевые протяжки могут выполняться профильной конструкции с относительно малым подъемом на каждый эвольвентный зуб либо групповыми. В последнем случае черновые эвольвентные зубья по аналогии с протяжками для прямобочных шлицев делаются секционными из двух зубьев. На первом прорезном зубе с увеличенной на 0,02 мм высотой затачиваются лыски, а зачистной зуб имеет полную ширину.

Протягивание является практически единственным методом обработки многогранных (квадратных, шестигранных) отверстий. Протяжки для получения отверстий с плоскими гранями конструируются по профильной и генераторной схемам резания. Предварительное отверстие под квадратное и шестигранное отверстия обычно выполняют сверлом диаметром на 0,3...0,5 мм меньшим, чем расстояние S_n между сторонами протягиваемого отверстия.

У квадратных и шестигранных протяжек (рис. 5.7) главные режущие кромки располагаются на углах зубьев и имеют форму дуг окружностей, диаметр которых увеличивается от первого к последнему. На первом зубе $d_1 = S_n$, а на последнем чистовом и на всех калибрующих d_n равен наибольшему диаметру протягиваемого отверстия (диаметру описанной окружности) с учетом разбивания или усадки отверстия, т.е. $d_n = D_{\max} \pm \delta$.

Шпоночные протяжки при работе устанавливаются в направляющих оправках. Продольное сечение направляющей оправки 1 с обрабатываемой деталью 4, опорным кольцом 3, опорной плитой станка 2 и тяговым патроном 5 показано на рис. 5.8, где даны обозначения, используемые при определении длины про-

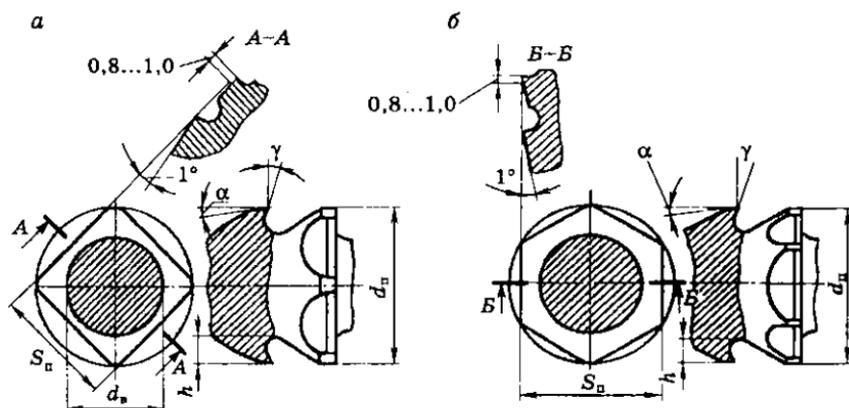


Рис. 5.7. Зубья квадратных (а) и шестигранных (б) протяжек

тяжки: l_4 — длина зажима хвостовика; l_3 — длина входа патрона в отверстие станка; l_c — толщина опорной плиты станка; l_a — длина выступающей части опорного кольца; l_d — длина выступающей части фланца направляющей оправки; l_b — длина втулки (посадочной части оправки); l' — длина, необходимая для беспрепятственного насаживания изделия в том случае, когда работа ведется без отсоединения протяжки от станка после каждого рабочего хода.

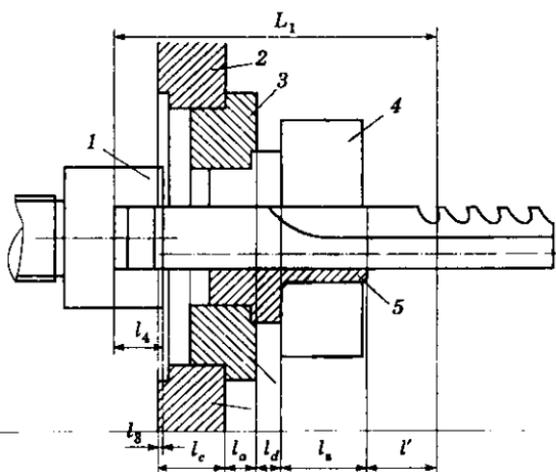


Рис. 5.8. Положение шпоночной протяжки на станке

Наружные протяжки, как и внутренние, могут работать по различным схемам срезания припуска и профилирования. В зависимости от габаритных размеров наружные протяжки могут быть цельными, составными и наборными, или секционными. Форма поперечного сечения тела обычной или секционной наружной плоской протяжки представляет собой прямоугольник или трапецию. Ширина прямоугольного сечения протяжки равна или больше ширины обрабатываемой поверхности. Желательно, чтобы ширина сечения была не меньше 12...15 мм. Высота поперечного сечения с учетом высоты зубьев принимается конструктивно. Она должна быть не менее 20...25 мм.

Улучшение отвода стружки обеспечивается, если дно стружечной канавки имеет боковой наклон под углом ψ (рис. 5.9). Срезаемая стружка за счет упора о стенки канавки протяжки не сворачивается и имеет форму сплошной ленты или шпаги, поэтому свободно и непрерывно сходит по стружечной канавке.

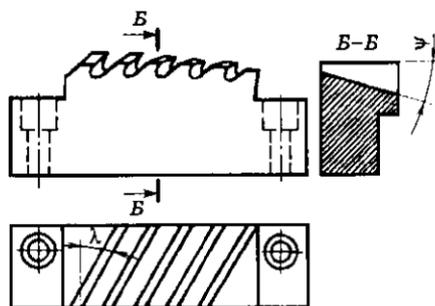


Рис. 5.9. Протяжка со свободным выходом стружки

Для обработки деталей, имеющих форму тел вращения, можно успешно использовать плоские (рис. 5.10, а, б) и спиральные цилиндрические (рис. 5.10, в) протяжки. В случае применения последних отсутствуют затраты времени на возвращение протяжки в исходное положение после выполнения каждого цикла обработки.

Протяжки широко применяются также в крупносерийном и массовом производстве зубчатых колес (рис. 5.11).

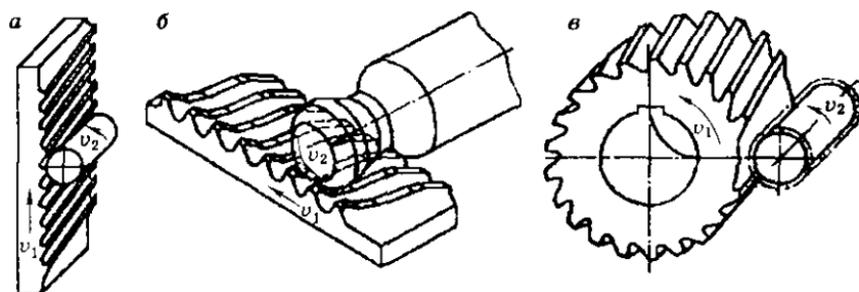
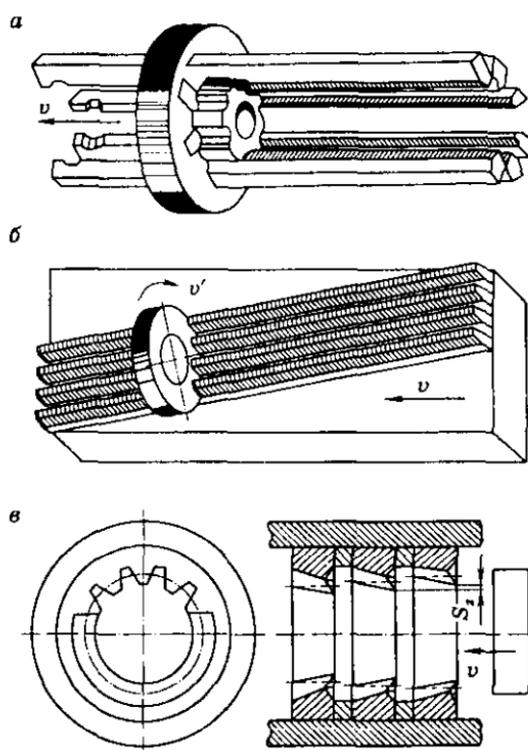


Рис. 5.10. Схема наружного протягивания тел вращения



— Рис. 5.11. Типы протяжек для обработки цилиндрических колес: —
 а — протягивание прямозубых колес комплектом единичных протяжек;
 б — то же для косозубых колес; в — протягивание прямозубых колес протяжкой с втулочными зубьями

5.3. Расчет и конструирование протяжки

Протяжка — весьма сложный инструмент, расчет которого требует ряда последовательных и связанных между собой действий. Рассмотрим их на примере проектирования протяжек для обработки круглых отверстий.

При проектировании таких протяжек необходимы следующие исходные данные:

- *данные о детали*: диаметр протягиваемого отверстия; поле допуска отверстия; марка обрабатываемого материала; наименьшая и наибольшая твердости обрабатываемого материала, условия его термообработки; шероховатость протянутой поверхности; длина протягиваемого отверстия; конструктивное исполнение детали (наличие прерывистых поверхностей);

- *данные о станке и приспособлении*: длина рабочего хода станка; тяговое усилие; конструкция патрона; толщина опорной планшайбы; размеры опорной плиты; расстояние от торца рабочего патрона до опорной плоскости; диапазон скоростей протягивания;

- *тип производства* (массовое, серийное, единичное);

- *возможности инструментального производства*: межцентровые расстояния токарного, круглошлифовального и заточного станков; размеры печей для термообработки; наименьший диаметр шлифовального круга заточного станка; угол наклона шпинделя заточного станка.

Проектирование протяжек производится в следующей последовательности.

1. Определяется группа обрабатываемости материала заготовки по его марке и твердости согласно ГОСТ 20365–74. Данный стандарт предусматривает группы обрабатываемости I–V для различных сталей, VI, VII — для чугунов, VIII, IX — для бронз и латуней и X — для алюминиевых сплавов. Если в стандарте нет заданной марки материала, то группу обрабатываемости назначают для наиболее близкой по химическому составу и твердости марки имеющегося материала.

2. С помощью табл. 5.1 устанавливают группу качества протянутой поверхности по качеству и параметру шероховатости поверхности отверстия, заданного чертежом.

Таблица 5.1

Группы качества протягиваемых цилиндрических отверстий

Группа качества	Технические требования	
	Параметр шероховатости	Квалитет точности
1	$Ra \leq 1,25$	Все начиная с 5
2	$Ra \leq 2,5$	7, 8
3	$Rz \leq 20$	9, 10
4	$Rz \leq 40$	11 и грубее

3. Выбор инструментального материала для рабочих частей протяжек зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, формы и размеров обрабатываемых поверхностей, технических требований на их изготовление и типа производства, в котором применяются протяжки. В массовом и крупносерийном производстве рабочие части изготавливают из быстрорежущих сталей марок P6M5, P6AM5, P9K5, P9Ф5, P9K5Ф5 и др. В мелкосерийном производстве применяют легированные инструментальные стали ХВГ или ХВСГ, а также стали P6AM5, P12Ф3. Твердость рабочей части и задней направляющей — 62...65 HRC, передней направляющей — 61...64 HRC, замковой части хвостовика — 43...51 HRC. При протягивании деталей из труднообрабатываемых материалов, жаропрочных и нержавеющей сталей с большими подачами на зуб целесообразно применять протяжки, рабочая часть которых изготовлена из твердых сплавов марок ТТ7К12, ВК6-М и др., с $S_2 < 0,1$ мм — из твердых сплавов марок Т5К10, Т14К8, ВК8 и др.

4. Протяжки из быстрорежущей стали диаметром до 15 мм и протяжки из легированных сталей всех размеров изготавливают цельными; диаметром 15...40 мм — сварными; диаметром свыше 40 мм — сварными или сборными. В последнем случае хвостовик вместе с передней шейкой, переходным конусом и частью

передней направляющей соединяется с рабочей частью при помощи резьбы. Хвостовик со стержнем протяжки сваривают по шейке, на расстоянии 15...25 мм от начала переходного конуса. Материал хвостовика — обычно стали 45X или 40X. Конструктивное исполнение и размеры хвостовиков цельных протяжек выбирают в зависимости от имеющегося на станке патрона по ГОСТ 4044-70, а навертных хвостовиков сборных протяжек — по ГОСТ 28048-89.

Чтобы хвостовик свободно проходил через отверстие в заготовке и в то же время был достаточно прочным, диаметр его выбирают ближайшим меньшим к диаметру отверстия до протягивания. Сила протягивания, допустимая прочностью хвостовика, рассчитывается по формуле

$$P_{\text{хв}} = [\sigma]_{\text{р}} F_{\text{оп}},$$

где $[\sigma]_{\text{р}}$ — допустимое напряжение при растяжении, МПа; $F_{\text{оп}}$ — площадь опасного сечения хвостовика, мм².

Площади опасных сечений хвостовиков приведены в ГОСТах. Для хвостовиков из быстрорежущей стали $[\sigma]_{\text{р}} = 400$ МПа; для хвостовиков из сталей ХВГ и 40X $[\sigma]_{\text{р}} = 300$ МПа.

Если сила протягивания, допустимая по условию прочности хвостовика, значительно превышает тяговое усилие, то диаметр хвостовика можно уменьшить. В этом случае хвостовику принятого диаметра должна соответствовать сила, допустимая прочностью его опасного сечения, несколько большая, чем тяговая сила станка.

5. Передние углы протяжки зависят от обрабатываемого материала и назначения зубьев и изменяются в пределах от -5 до 20°. Формы передних поверхностей приведены на рис. 5.12.

Задние углы протяжек рекомендуется принимать в следующих пределах: для черновых и переходных зубьев — 3°; для чистовых зубьев — 2°; для калибрующих зубьев — 1°.

На задних поверхностях черновых, переходных и чистовых зубьев может выполняться цилиндрическая ленточка шириной не более 0,05 мм, на калибрующих зубьях ширина ленточки может быть 0,2...0,6 мм.

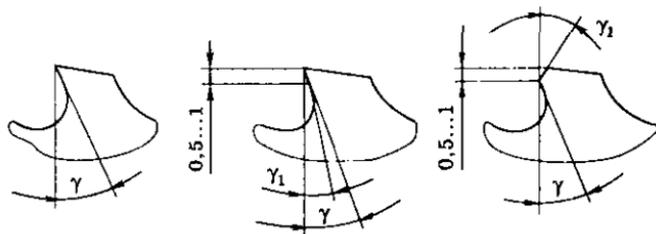


Рис. 5.12. Формы передних поверхностей протяжек (по ГОСТ 20365-74)

6. Выбор рекомендуемой скорости протягивания тесно связан с требованиями к обработанной поверхности и обрабатываемым материалом и определяет период стойкости протяжки.

7. Полный припуск A на протягивание круглых отверстий определяется согласно справочной литературе. Тогда наименьший диаметр отверстия под протягивание $D_0 = D - A$, где D — диаметр протянутого отверстия. Значение D принимается по минимальному значению для отверстий квалитетов 7 и 8 и по максимальному для отверстий квалитета 11 и более грубых.

8. Выбор подачи на зуб S_z или подъема на группу зубьев S_{zT} имеет решающее значение для процесса протягивания. Чем толще стружка, снимаемая одним зубом или группой зубьев, тем короче будет протяжка, меньше ее стоимость и выше производительность процесса протягивания. Однако при срезании чрезмерно толстых стружек растут силы резания, что может привести к разрыву протяжки, а объем стружечных канавок может оказаться недостаточным для размещения стружки, и следовательно, качество обработанных поверхностей будет низким. Кроме того, величину наибольшей подачи ограничивают срывы или сколы металла, появляющиеся при выходе зубьев из контакта с деталью, а также задиры на обработанной поверхности.

У протяжек одинарной схемы резания подачи на зуб обычно принимаются постоянными (табл. 5.2), за исключением нескольких последних зубьев (от 2 до 5), на которых S_z постоянно уменьшается. Эти зубья называются *переходными* и необходимы для обеспечения плавности падения нагрузки на протяжку, что способствует снижению шероховатости обработанной поверхности. Подача на зуб для последнего переходного зуба должна быть не более 0,01...0,02 мм.

Таблица 5.2

Подъемы режущих зубьев круглых протяжек с одинарной схемой срезания припуска, мм

Обрабатываемый материал	Подъем режущих зубьев
Стали:	
углеродистые и малолегированные	0,015...0,03
высоколегированные	0,01...0,03
Чугуны:	
серые	0,03...0,08
ковкие	0,05...0,10
Алюминиевые сплавы	0,02...0,05
Бронза, латунь	0,05...0,12

В протяжках с групповой схемой срезания припуска различают черновые зубья, срезающие основную его часть, переходные и чистовые зубья, обеспечивающие требуемые шероховатость и размеры протянутой поверхности. При этом черновые зубья работают с максимально допустимыми подачами, переходные — с постоянно снижающейся подачей и чистовые — с наименьшей допустимой подачей (0,01...0,005 мм).

Черновые подачи S_{2T} , ограниченные режущей способностью протяжки, приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Рекомендуемые подачи черновых зубьев круглых протяжек с групповой схемой срезания припуска, мм

Скорость резания, м/мин	Группа обрабатываемости													
	I		II		III		VI		VII, VIII		IX		X	
	Группа качества протягиваемой поверхности (см. табл. 5.1)													
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
До 3	0,18	0,23	0,14	0,18	0,12	0,15	0,16	0,20	0,14	0,18	0,12	0,16	0,15	0,20
3...6	0,14	0,19	0,12	0,15	0,10	0,12	0,13	0,17	0,11	0,15	0,10	0,13	0,12	0,17
6...10	0,12	0,15	0,10	0,12	0,08	0,10	0,10	0,14	0,09	0,12	0,08	0,10	0,10	0,14
10...15	0,10	0,12	0,08	0,10	0,06	0,08	0,08	0,12	0,07	0,10	0,06	0,08	0,08	0,12

9. При протягивании важно знать форму и размеры стружки, так как от этих данных зависит правильная работа протяжки.

Впадины между зубьями должны быть таких размеров и формы, чтобы в них свободно помещалась стружка. Если стружка не укладывается во впадине, то происходит ее прессование, что может привести к разрыву протяжки.

Профиль зубьев и форма стружечных канавок протяжки принимаются согласно рис. 5.13, где *a* — двухрадиусные канавки, используемые при обработке пластичных материалов; *б* — канавки с плоской спинкой и радиусной передней поверхностью зуба, применяемые при обработке хрупких материалов с образованием стружки надлома; *в* — удлиненные канавки с радиусными спинкой и передней поверхностью зубьев и прямолинейным участком по дну канавки, используемые при обработке глубоких отверстий.

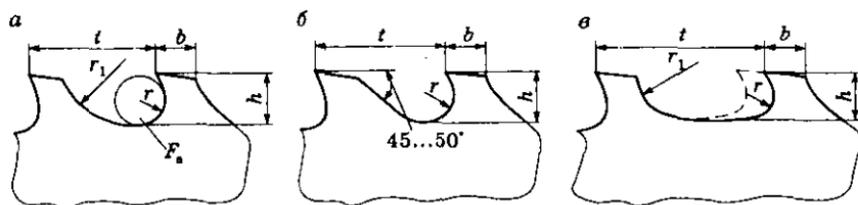


Рис. 5.13. Рекомендуемые формы зубьев и стружечных канавок круглых протяжек

При выборе глубины стружечной канавки необходимо учитывать площадь активного сечения ее профиля F_a . Должно быть выдержано соотношение $F_a \geq F_c$, где $F_c = lS_zK$ — площадь, занимаемая стружкой. Принимая $F_a = \pi h^2/4$, глубину стружечной канавки h , необходимую для размещения стружки при подъеме одинарных черновых зубьев на S_z или группы черновых зубьев на S_{zT} , определяют по формулам:

- для сливной стружки

$$h = 1,1283\sqrt{Kl_S S_z},$$

- для стружки надлома

$$h = 0,8917\sqrt{Kl_S S_z},$$

где l_S — суммарная длина протягиваемых участков детали, мм; K — коэффициент заполнения стружечной канавки.

Значения коэффициента заполнения стружечной канавки K для протяжек с одинарной схемой срезания припуска можно принимать в соответствии с рекомендациями литературы.

Для протяжек с групповой схемой срезания припуска при обработке сталей всех групп обрабатываемости и алюминиевых сплавов значения коэффициента K равны 3 (допускается 2,5); для материалов VI, VII, VIII и IX групп обрабатываемости $K = 2,5$ (допускается 2).

Размеры стружечных канавок (см. рис. 5.13, а, б) можно считать по соотношениям:

$$t = (2,5 \dots 2,9)h; \quad r = (0,5 \dots 0,55)h;$$

$$b = (0,3 \dots 0,35)t; \quad r_1 = (0,65 \dots 0,8)t$$

либо принять в соответствии с ГОСТ 20365-74.

10. Шаг черновых зубьев t рассчитывают или выбирают по ГОСТ 20365-74 в зависимости от принятой глубины стружечной канавки. Поскольку одной и той же глубине стружечной канавки может соответствовать несколько значений шага, то для первого варианта расчета выбирают меньший из них. В протяжках с групповой схемой срезания припуска шаг и профиль переходных зубьев принимают такими же, как у черновых.

Количество одновременно работающих зубьев находят по формуле

$$z_p = \frac{l}{t} + 1,$$

где l — длина протягиваемого отверстия.

Если дробная часть z_p меньше 0,9, то ее не учитывают, а свыше 0,9 — округляют в большую сторону.

Минимально допустимое $z_p = 3$. При очень короткой длине протягиваемого участка допускается $z_p = 2$.

11. После выбора размеров черновых стружечных канавок следует выполнить проверочные расчеты на разрыв протяжки по дну первой стружечной канавки и по тяговому усилию станка.

В первом случае должно выдерживаться условие

$$\frac{4P_{z \max}}{\pi(D_0 - 2h)^2} \leq [\sigma],$$

где $[\sigma] = 300 \dots 350$ МПа — допустимое напряжение в материале режущей части протяжки; $P_{z \max}$ — максимальная сила протягивания.

Во втором случае $P_{z_{\max}} \leq (0,8 \dots 0,9)Q$, где Q — номинальное тяговое усилие по паспорту станка.

Если приведенные выше неравенства не выдерживаются, следует уменьшить подачу для черновых зубьев и повторить расчеты согласно п. 10–11.

Максимальная сила протягивания для круглых протяжек может быть определена следующим образом:

$$P_{z_{\max}} = C_p D S_{z_0}^x z_p K_m K_c K_\gamma K_{\text{и}} K_k K_p.$$

Здесь C_p , x — коэффициент и показатель степени (табл. 5.4); D — диаметр отверстия после протягивания; S_{z_0} — подъем черновых зубьев; z_p — наибольшее количество одновременно работающих зубьев; K_m , K_c , K_γ , $K_{\text{и}}$, K_k , K_p — коэффициенты, учитывающие соответственно влияние обрабатываемого материала, условий охлаждения, переднего угла, степени износа зубьев протяжки, группы качества протягиваемого отверстия и способа разделения стружки (приводятся в справочной литературе).

Для протяжек с групповой схемой срезания припуска вместо z_p следует подставлять количество одновременно работающих черновых групп зубьев $z_0 = z_p / z_{r0}$, где z_{r0} — количество зубьев в черновой группе.

Таблица 5.4

Значения C_p и x в формуле для расчета силы протягивания круглой протяжкой

Обрабатываемый материал	Твердость НВ	Временное сопротивление, МПа	C_p	x
Стали углеродистые	< 200	< 700	7000	0,85
	200...230	700...800	7620	0,85
	> 230	> 800	8420	0,85
Стали легированные	< 200	< 700	7620	0,85
	200...230	700...800	8420	0,85
	> 230	> 800	10000	0,85
Стали хромомолибденные	250...270	—	8000	0,80
	280...310	—	9100	0,87
Серые чугуны	≤ 200	—	3000	0,73
	> 200	—	3540	

12. При проектировании протяжек с групповой схемой срезания припуска по справочной литературе определяются подъемы на переходных и чистовых группах зубьев, а также припуски A_n для переходных и $A_{\text{ч}}$ для чистовых зубьев. Тогда припуск на черновые зубья равен $A_0 = A - A_n - A_{\text{ч}}$.

Количество групп черновых зубьев равно

$$i_0 = \frac{A_0}{2S_{z0}}$$

Если i_0 получается дробным, его округляют до ближайшего меньшего целого числа. Остающийся не срезанным слой металла (остаточный припуск) в этом случае равен

$$A_{\text{ост}} = A_0 - 2S_{z0}i_0.$$

В зависимости от значения остаточный припуск может быть присоединен к черновой, переходной или чистовой части. Если половина остаточного припуска превышает подъем зубьев на сторону первой переходной группы, то его для срезания назначают одну дополнительную группу черновых зубьев (первую). Учитывая, что толщина срезаемого слоя в этом случае меньше, чем подача S_{z0} , расстояние этой группы зубьев от передней направляющей принимается равной шагу чистовых зубьев протяжки.

Если $A_{\text{ост}}/2$ меньше подъема на сторону первой переходной группы, но превышает 0,02...0,03 мм, то остаточный припуск добавляют к припуску, срезаемому переходными зубьями протяжки. Если же $A_{\text{ост}}/2 < 0,02...0,03$ мм, то остаточный припуск суммируется с припуском на чистовые зубья, количество которых соответственно увеличивают.

13. Количество черновых зубьев $z_0 = i_0^* z_{r0}$, где i_0^* — принятое окончательно количество групп черновых зубьев после распределения остаточного припуска между переходной, чистовой или черновой частями протяжки.

Для протяжек с одинарной схемой срезания припуска $z_0 = A_0/2S_z + (2...3)$.

Количество переходных, чистовых и калибрующих зубьев выбирают в соответствии с рекомендациями справочной литературы и корректируют в зависимости от распределения остаточного припуска.

Общее количество всех зубьев протяжки

$$\sum z = z_0 + z_{\text{п}} + z_{\text{ч}} + z_{\text{к}}.$$

14. Длина рабочей части протяжки

$$L_{\text{р}} = l_0 + l_{\text{п}} + l_{\text{ч}} + l_{\text{к}} = t_0(z_0 + z_{\text{п}}) + \sum t_{\text{ч}} + \sum t_{\text{к}},$$

где $\sum t_{\text{ч}}$ и $\sum t_{\text{к}}$ — суммы переменных шагов соответственно чистовых и калибрующих зубьев.

Шаги чистовых и калибрующих зубьев — переменные, состоящие из трех значений (рис. 5.14). Шаги принимают по ГОСТ 20365–74 в зависимости от шага черновых зубьев t_0 . Первый шаг на чистовой части (между первым и вторым чистовым зубом) имеет большее значение (t_3). Профиль стружечной канавки для всех трех шагов одинаковый (т.е. одинаковы h , b , r , r_1). Его выбирают по ГОСТ 20365–74 по меньшему шагу t_1 и средней глубине профиля.

В отличие от режущих размеры и форма калибрующих зубьев у протяжек всех схем резания обычно одинаковы и соответствуют размерам последнего режущего зуба и форме готового отверстия.

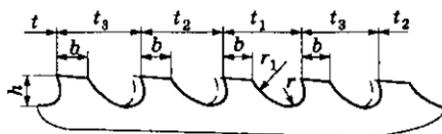


Рис. 5.14. Шаги чистовых зубьев круглых протяжек групповой схемы срезания припуска

15. После определения количества и шагов зубьев составляется таблица диаметров зубьев, размещаемая на чертеже протяжки.

Диаметр калибрующих зубьев $D_{\text{к}}$ и диаметр последнего чистового зуба можно принимать равными максимальному в пределах допуска на диаметр отверстия ($D_{\text{к}} = D_{\text{max}}$).

— По мере переточек зубья калибрующей части становятся режущими, и после нескольких переточек первый калибрующий зуб будет выполнять работу последнего режущего зуба. В дальнейшем в работу вступает второй калибрующий зуб и так далее,

пока не будет использована большая часть калибрующих зубьев. В любом случае на протяжке должно оставаться не менее трех калибрующих зубьев.

Рекомендации по выбору предельных отклонений зубьев протяжек приведены в ГОСТ 28442–90.

16. В протяжках с одинарной схемой срезания припуска определяются размеры и положение стружкоразделительных канавок. Деление стружки необходимо осуществлять при протягивании пластичных материалов, когда образуется сливная стружка. При обработке материалов, дающих стружку надлома, стружкоразделительные канавки можно не делать.

Деление стружки по ширине облегчает свертывание ее в вихрь, что требует для ее размещения меньшего объема стружечной канавки, способствует свободному удалению стружки из межзубных канавок после их выхода из контакта с обрабатываемой поверхностью детали. Стружкоразделительные канавки у протяжек одинарной схемы резания наносятся на каждом режущем зубе в шахматном порядке (рис. 5.15, а). Профиль стружкоразделительных канавок может быть прямоугольным, полукруглым и угловым с углом $\omega_k = 45 \dots 60^\circ$ (рис. 5.15, б). Прямоугольный и полукруглый профили находят ограниченное применение, так как быстро изнашиваются и на вершинах таких канавок часто образуются трещины. Угловые канавки имеют угол при вершине более 90° и обладают большей износостойкостью.

Количество канавок можно определить по формуле $n_k = b/(5 \dots 10)$, где $b = \pi D$ — длина режущей кромки.

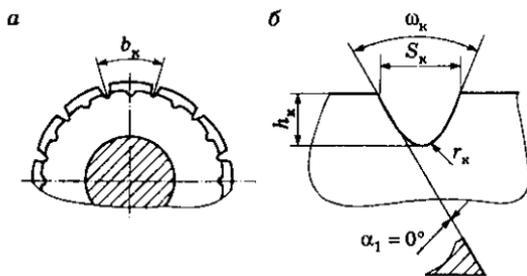


Рис. 5.15. Расположение и размеры стружкоразделительных канавок на круглых протяжках с одинарной схемой срезания припуска

Направление канавок соответствует направлению движения протяжки. Дно канавок должно быть расположено параллельно задней поверхности зуба протяжки. Только в этом случае угол α_1 будет больше нуля. Достичь этого можно лишь при достаточно большом шаге, когда будет обеспечен выход шлифовального круга, которым прорезают стружкоразделительные канавки. Чаще всего дно канавки параллельно оси протяжки и угол $\alpha_1 = 0^\circ$ (рис. 5.15, б).

В протяжках с групповой схемой срезания припуска для назначения количества выкружек и их ширины на черновых зубьях весь периметр стружки, срезаемый одной группой, разделяют на равные части между зубьями группы (рис. 5.16). На каждый зуб группы приходится часть периметра $l_z = \pi D/z_c$. Значения z_c приведены в справочниках или в ГОСТ 20365-74.

Стружка, срезаемая каждым зубом, равномерно распределяется между несколькими его режущими секторами, расположенными на равном расстоянии друг от друга по периметру зуба и разделенными между собой выкружками.

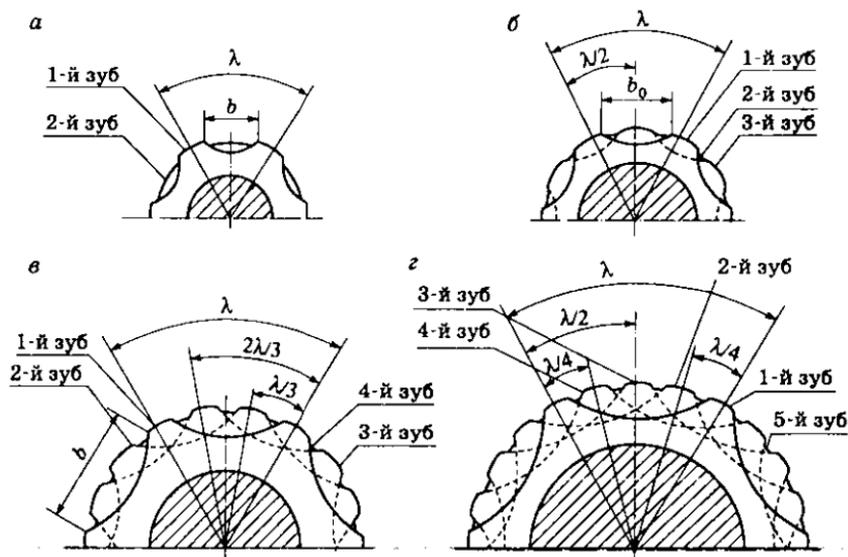


Рис. 5.16. Схема расположения выкружек:

а — группа из двух зубьев; б — из трех зубьев; в — из четырех зубьев; г — из пяти зубьев

Количество режущих секторов, а значит, и выкружек определяют по формуле

$$N = \frac{l_2}{a},$$

где a — ширина режущего сектора; рекомендуется $a = (1,0 \dots 1,3)\sqrt{D}$ для протяжек диаметром менее 100 мм и $a = 10 \dots 12$ мм для протяжек с диаметром больше 100 мм.

Окончательно для протяжек диаметром меньше 100 мм

$$N = \frac{(2,4 \dots 3,1)\sqrt{D}}{z_c},$$

для протяжек диаметром более 100 мм

$$N = \frac{(0,25 \dots 0,3)D}{z_c}$$

с округлением до ближайших больших четных чисел. Ширину выкружки определяют по формуле

$$b_0 = \frac{\pi D(z_c - 1)}{N z_c}.$$

Количество выкружек и ширина черновых зубьев определяются согласно литературе. Радиус выкружек R_n назначают в зависимости от ширины выкружки и диаметра протяжки. Там же даны наибольшие допустимые радиусы шлифовального круга для вышлифовки выкружек. Для обеспечения свободного прохождения стружки в нижней части профиля выкружки необходимо, чтобы глубина выкружки $C > 3S_{20}$.

Количество выкружек на переходных и чистовых зубьях рассчитывают по формуле $N_q = 1,45\sqrt{D}$ с округлением до ближайшего четного числа.

Ширину выкружек на переходных и чистовых зубьях для обеспечения перекрытия выкружек режущими секторами последующих зубьев принимают на 2...3 мм меньше, чем на черновых зубьях: $b_n = b_0 - (2 \dots 3)$.

При объединении переходных и чистовых зубьев в группы диаметры их внутри одной группы одинаковы. Выкружки на переходных и чистовых зубьях наносят на каждом зубе и распо-

лагают в шахматном порядке относительно предыдущего зуба. При очень точном выполнении диаметров переходных и чистовых зубьев вторые зубья в группе можно делать круглыми (без выкружек), как на черновых, но без занижения по диаметру. Радиусы выкружек на переходных и чистовых зубьях приведены в справочной литературе.

17. Диаметр передней направляющей принимают равным наименьшему диаметру отверстия до протягивания с полем допуска по е8.

Длину передней направляющей $l_{п.н}$ выбирают в зависимости от отношения длины протягивания к диаметру протяжки:

$$l_{п.н} = 0,75l \text{ при } l/D > 1,5;$$

$$l_{п.н} = l \text{ при } l/D < 1,5.$$

Возможные формы передней направляющей в продольном сечении зависят от длины отверстия (рис. 5.17). Размеры составляющих элементов передней направляющей выбираются из конструктивных соображений.

18. Длина переходного конуса выбирается из следующих соотношений:

Диаметр протяжки, мм	До 30	Свыше 30 до 70	Свыше 70
Длина направляющего конуса $l_{н.к}$, мм	15	20	25...30

19. Расстояние L_1 от переднего торца протяжки до первого зуба (рис. 5.18) рассчитывается в зависимости от используемого на протяжном станке патрона. Например, для наиболее распространенного быстродействующего патрона с ручным управлением (хвостовик с круговой выточкой) расстояние L_1 определяют по формуле

$$L_1 = l_c + l_{пл} + l_{пр} + l + k - u + l_2 + 45,$$

где l_c — толщина стола протяжного станка; $l_{пл}$ — толщина фланца опорной планшайбы; $l_{пр}$ — толщина фланца приспособления (принимается конструктивно, обычно 30...40 мм); l — длина протягивания; k и u — параметры патрона для крепления протяжки; l_2 — длина захватной части переднего хвостовика протяжки.

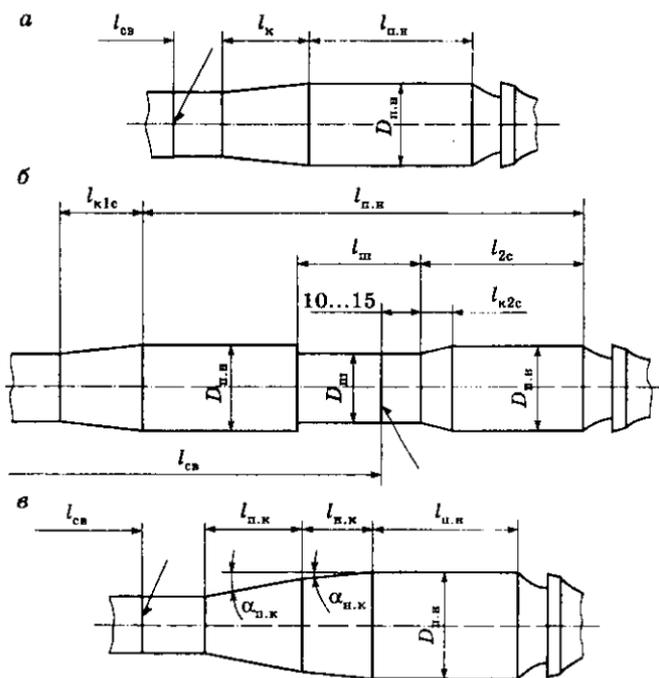


Рис. 5.17. Конструктивные исполнения передней направляющей: а — для отверстий небольшой длины (менее $5D$); б — для отверстий большой длины (свыше $5D$); в — с двойным переходным конусом; $l_{св}$ — длина гладкой части до места сварки; $l_{к}$ — длина переходного конуса; $l_{п.н}$, $D_{п.н}$ — длина и диаметр передней направляющей; $l_{ш}$, $D_{ш}$ — длина и диаметр промежуточной шейки; $l_{2с}$ — длина второй ступени передней направляющей; $l_{к1с}$, $l_{к2с}$ — длины конусных частей соответственно первой и второй ступени; $l_{п.к}$, $l_{н.к}$ — длины приемного и направляющего конусов; $\alpha_{п.к}$, $\alpha_{н.к}$ — углы приемного и направляющего конусов

Для быстродействующего патрона с автоматическим управлением

$$L_1 = P + l_{в.пл} + l_{пр} + l - W_{\max} + 40,$$

где $l_{в.пл}$ — высота планшайбы станка; величины P и W_{\max} выбираются в зависимости от диаметра d_1 хвостовика.

Расстояние от переднего торца протяжки до места сварки принимается из следующих соображений:

- если диаметр хвостовика $d_1 \leq 30$, то $l_{св} = L_1 - l_{п.н} - l_{к} - 0,5d_1$;
- если диаметр хвостовика $d_1 > 30$, то $l_{св} = L_1 - l_{п.н} - l_{к} - 15$.

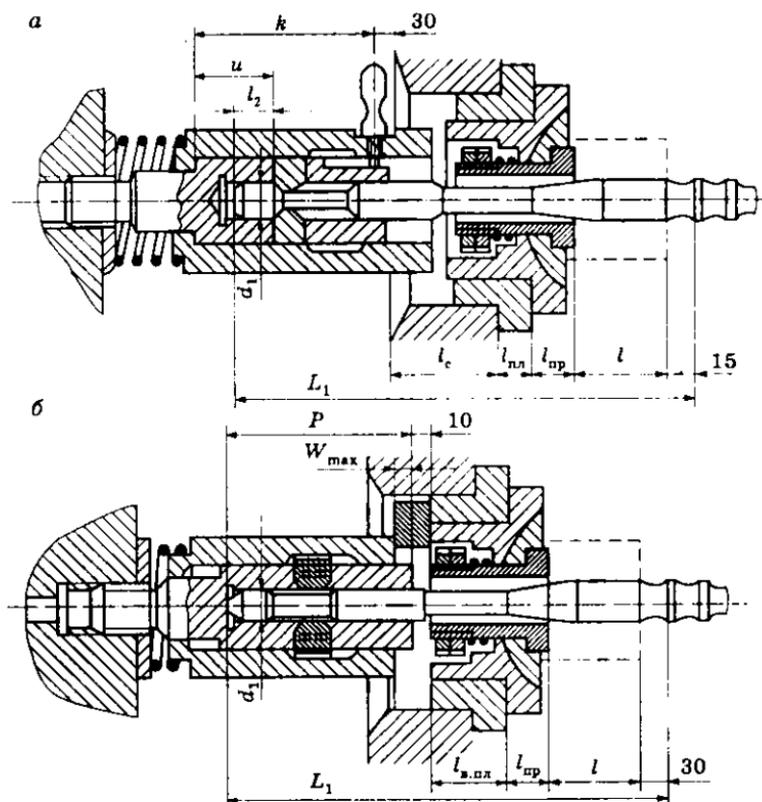


Рис. 5.18. Схемы к расчету длины протяжки от переднего торца до первого зуба

20. Диаметр задней направляющей $D_{з.н}$ принимают равным наименьшему предельному диаметру протянутого отверстия с полем допуска по $f7$, а в некоторых случаях — по $f9$.

Рекомендуемая длина задней направляющей приведена в литературе.

21. Общая длина протяжки равна сумме длин передней части (от переднего торца до первого зуба) L_1 , рабочей части L_p , задней направляющей $l_{з.н}$ и заднего хвостовика $l_{з.хв}$:

$$L = L_1 + L_p + l_{з.н} + l_{з.хв}$$

Технические требования к круглым протяжкам определяются ГОСТ 28442-90.

5.4. Расчет режимов резания при протягивании

Определение режимов резания при протягивании сводится к назначению скорости резания, так как подача и ширина среза обуславливаются конструкцией протяжки. Рекомендации по выбору подач у различных видов и конструкций протяжек приводятся в справочной литературе.

Ширина среза при протягивании измеряется вдоль режущей кромки. У шпоночной протяжки — это ширина паза; в протяжках круглых, шлицевых и т. д. ширина среза будет соответственно равна длине активной части режущей кромки: для круглой протяжки — длине окружности, для шлицевой — суммарной ширине шлицев и т. д.

Выбор рекомендуемой скорости протягивания зависит от требований к обработанной поверхности и от обрабатываемого материала. Рекомендуемые скорости протягивания круглых отверстий приведены в табл. 5.5, для других форм поверхностей — принимаются согласно рекомендациям справочной литературы.

Таблица 5.5
Рекомендуемые скорости протягивания круглых отверстий, м/мин

Тип производства	Группа качества поверхности	Обрабатываемый материал							
		Сталь					Чугун, бронза		Алюминиевые сплавы
		I	II	III	IV	V	VI, VIII, IX	VII	
Массовое, крупно- и среднесерийное	1	8	8	6	5	3	9	6	4
	2	9	9	8	6	4	12	6	6
	3	13	12	9	8	4	15	9	9
	4	15	13	12	—	—	15	13	12
Мелкосерийное и единичное	1–4	8	6	6	3	3	9	6	4

Примечания: 1. Влияние марки материала режущей части

Марка стали.....	P18, P12Ф5М	P6AM5, P12Ф3	P6M5K5, P6Ф2K8M5	XBG
Коэффициент	1,6	1,0	2,0	0,5

2. При протягивании сталей повышенной вязкости скорость резания снижается на 20...25 %.

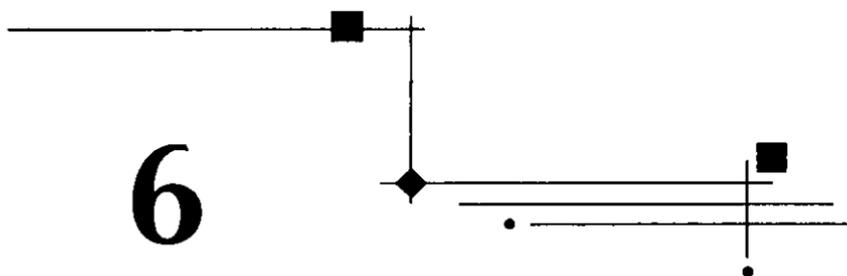
3. Для протяжек диаметром свыше 100 мм скорости резания могут быть снижены на 30 %.

Машинное время за один проход при протягивании можно определить по формуле

$$T_o = \frac{L}{1000} \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{v_{x,x}} \right),$$

где L — длина рабочего хода, зависящая от длины протяжки и конструктивных особенностей станка; v и $v_{x,x}$ — скорости резания и холостого хода (величина $v_{x,x}$ приводится в паспорте станка).

6



РЕЗЬБОНАРЕЗАНИЕ

6.1. Нарезание резьбы резцами, гребенками и резьбонарезными головками



Резцы служат для нарезания наружной и внутренней резьбы. Они подразделяются на *стержневые, призматические и круглые, однониточные и многониточные* (рис. 6.1). В качестве режущей части в однониточном резце можно использовать специальные сменные твердосплавные пластины либо выполнять их цельными (сварными). В последнем случае геометрия и конструкция однониточных резцов в целом соответствуют аналогичным фасонным резцам (см. § 2.10). Передний угол, как правило, принимается равным 0° , чтобы исключить коррекцию профиля. Кинематический задний угол на правой и левой режущих кромках неодинаков. Для треугольных резьб с углом подъема $\tau = 3 \dots 4^\circ$ влияние этого изменения не учитывают. Для многозаходной и трапецеидальной резьб изменения задних углов достаточно велики и их следует учитывать при назначении задних углов резца, а также для обеспечения равенства передних углов на правой и левой кромках (рис. 6.2).

Нарезание резьбы резцами производится в несколько проходов, причем последовательность снятия стружки может быть двоякой.

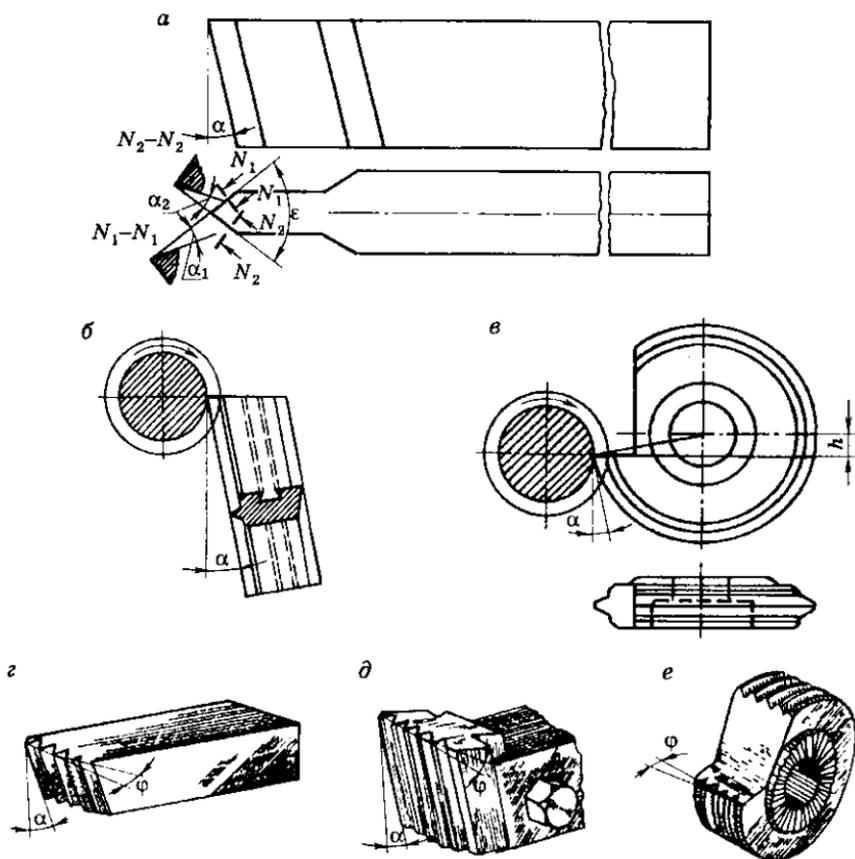


Рис. 6.1. Разновидности резьбонарезных резцов: а-в — стержневой, призматический, круглый однониточные; г-е — то же многониточные



Рис. 6.2. Изменение геометрии резьбонарезного резца без учета угла подъема резьбы τ (а) и с его учетом (б)

Метод 1. Инструмент совершает следующие движения (рис. 6.3, а): *I* — радиальное движение D_{Sp} на глубину резания S_p ; *II* — рабочий ход D_S вдоль оси заготовки со снятием стружки; *III* — быстрый радиальный отвод; *IV* — быстрый обратный ход резца в исходное положение. При таком цикле нарезания резьбы во время рабочего хода обе режущие кромки резца одновременно срезают симметричные стружки.

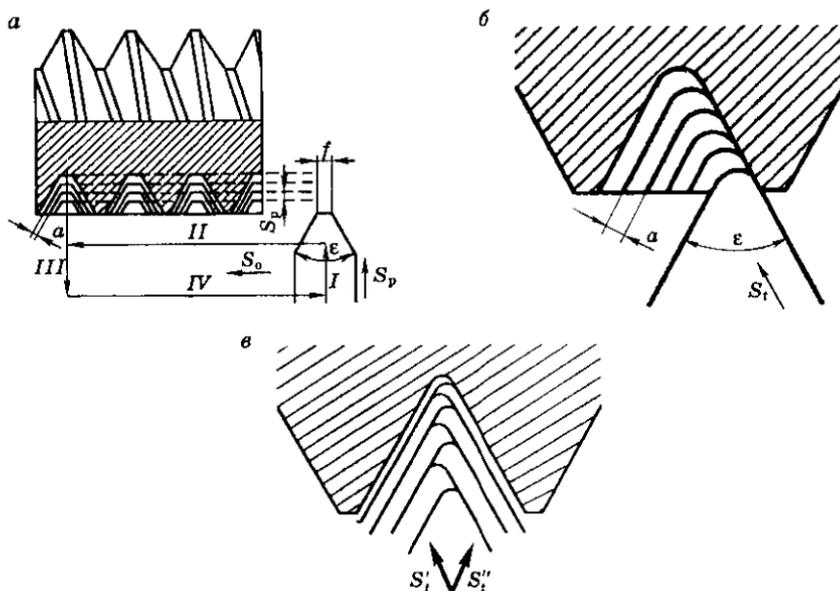


Рис. 6.3. Схемы нарезания резьбы резцом

Метод 2. Верхние салазки суппорта устанавливаются под углом 60° к оси нарезаемой детали (рис. 6.3, б). После каждого прохода головку суппорта перемещают вперед в направлении S_1 . При таком методе в работе участвует только одна режущая кромка резца. Чтобы избежать работы правой режущей кромки, угол при вершине резца ϵ должен быть меньше 60° , а левую кромку поворачивают точно на угол 30° . При этом правая кромка будет образовывать небольшой угол с уже нарезанной правой сторо-

ной резьбы. Второй метод нарезания резьбы имеет преимущество: передняя поверхность резца может быть повернута, т.е. может не совпадать с горизонтальной плоскостью, как это требуется для резцов, работающих по первому методу. Однако в конце нарезания резьбы должен производиться чистовой проход по первому методу.

Можно использовать также *комбинированные схемы* (рис. 6.3, в). Для нарезания резьбы односторонним резцом в станках с ЧПУ предусмотрены специальные циклы (ГОСТ 20999–83), которые обеспечивают высокую производительность и точность обработки.

Нарезание резьбы *гребенками* более эффективно, так как их зубья представляют собой ряд последовательно расположенных резцов. При этом обеспечивается получение полного профиля резьбы за один-два прохода. В зубьях гребенки различают режущую и калибрующую части. Зубья режущей части срезаны под углом φ (см. рис. 6.1, г–е) и снимают основную часть припуска. Калибрующие зубья имеют полный профиль и окончательно зачищают резьбу. Недостатком нарезания резьб гребенками является получение менее точной и чистой резьбы по сравнению с нарезанием резцом, а сбег резьбы на нарезанной детали равен длине заборной части гребенки, что не всегда допустимо.

Гребенки можно устанавливать в державки (тогда они будут работать как обычные фасонные резцы с осевой подачей) либо в резьбонарезные головки.

Резьбонарезные головки бывают *самооткрывающиеся* и *регулируемые*. В первом случае обеспечивается отвод гребенок после нарезания резьбы, что исключает необходимость обратного свинчивания головки с нарезаемой детали и повышает производительность обработки. Во втором случае возможны только установка, закрепление и регулирование гребенок без открывания головки после нарезания резьбы. Исходя из этого большее распространение получили *самооткрывающиеся головки*.

В зависимости от расположения и конструкции гребенок самооткрывающиеся головки бывают:

- с плоскими радиальными гребенками (рис. 6.4, а);

- плоскими тангенциальными гребенками (рис. 6.4, б);
- круглыми радиальными гребенками (рис. 6.4, в).

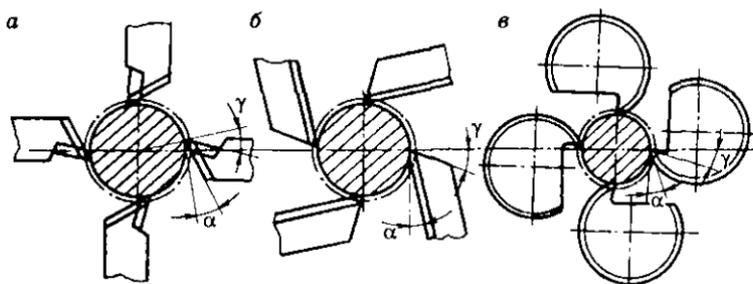


Рис. 6.4. Расположение гребенок в резьбонарезных головках

6.2. Нарезание резьбы плашками

Для нарезания наружных резьб с небольшим шагом и их калибрования используются *плашки* (рис. 6.5, а, б). Передний угол γ зубьев плашки выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала и равен $10 \dots 12^\circ$. Задний угол α образуется путем затылования только по наружному диаметру заборной части. Величина его составляет $6 \dots 9^\circ$. Угол конуса заборной части 2ϕ для нормализованных плашек выбирается равным 50° . Передняя поверхность плашки — радиусная или плоская. Ширина плашки $H = 2l_1 + l_2$, где l_1 — длина заборной части; l_2 — длина калибрующей части, равная двум–шести шагам резьбы). Число стружкоотводных отверстий обычно равно 3–8.

При работе плашки закрепляются в ручном воротке или патроне. Для крепления плашки на ее наружной поверхности выполняют три или четыре конических углубления (рис. 6.5, в). Нижние гнезда с углом конуса 60° выполнены под установочный винт 1. Верхние гнезда с углом 90° поджимные, они смеще-

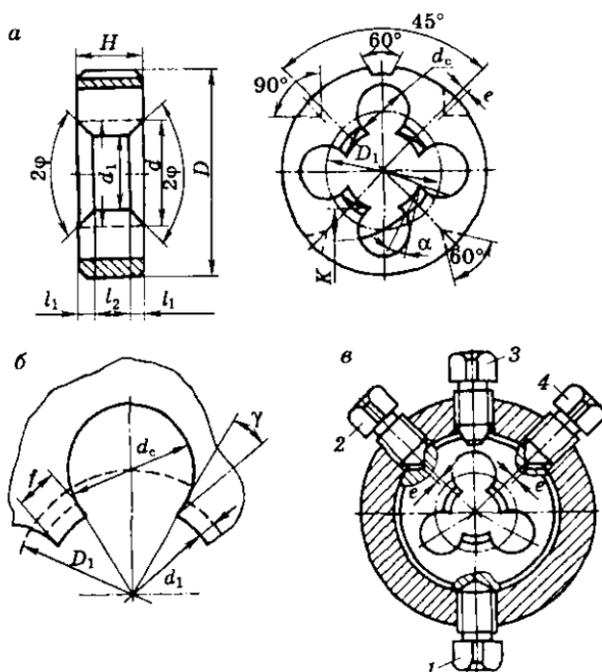


Рис. 6.5. Конструктивные элементы и геометрия круглой плашки:
 а — общий вид; б — оформление стружечной канавки; в — крепление в воротке

ны от оси на величину $e = 0,5 \dots 2$ мм для лучшего закрепления плашки винтами 2 и 4. У новых плашек сверху выполняют паз, перемычка которого разрезается после двух-трех переточек. Поджимные гнезда позволяют после удаления перемычки регулировать диаметр нарезаемой резьбы с помощью винтов 2, 3, 4.

К недостаткам нарезания резьбы плашками следует отнести низкую производительность, невысокое качество нарезанной резьбы, а также сложность изготовления и особенно затачивания самой плашки. Низкие допустимые скорости резания при работе плашками обусловлены плохим теплоотводом узких гребенок.

6.3. Нарезание резьбы метчиками

Метчик — металлорежущий инструмент для нарезания резьбы в предварительно просверленных отверстиях, т.е. он нарезает внутреннюю резьбу. Внешне метчик представляет собой винт с продольными прямыми или винтовыми канавками, образующими режущие кромки. Нарезание резьбы метчиками может осуществляться по копиру, т.е. с принудительной осевой подачей, или самозатягиванием. В этом случае в начале работы к метчику прикладывают осевое усилие, а после нарезания первых ниток снимают его. Метчик продолжает самостоятельное перемещение в осевом направлении за счет образования временной винтовой передачи «метчик — нарезанные витки».

По способу применения и назначению метчики бывают:

- *машинно-ручные*, для нарезания резьбы на станках и вручную; профиль резьбы шлифован и затылован;
- *ручные*, для нарезания резьбы вручную; профиль резьбы не шлифован и не затылован; в результате велики крутящий момент и трение на рабочих поверхностях; изготавливают в комплекте из двух-трех штук с соответствующим распределением припуска по площади вырезаемой впадины;
- *гаечные*, для нарезания резьбы в гайках; работают без вывертывания; отличаются от машинно-ручных удлиненной заборной частью и длинным хвостовиком (прямым или изогнутым), на который в процессе работы нанизываются гайки;
- *плащечные и маточные*, для нарезания и калибрования резьбы в плашках, с конической заборной частью;
- *конические*, для нарезания конических резьб; режут всей длиной рабочей части;
- *специальные*, с бочкообразным зубом, регулируемые, самооткрывающиеся и т.д.

Метчик состоит из *хвостовика* и *рабочей части* (рис. 6.6). На цилиндрическом шлифованном хвостовике l_x выполнен квадрат для передачи крутящего момента, иногда и канавка для захвата шариками быстросменного патрона. В некоторых случаях изготавливают хвостовики с конусами Морзе. Рабочая часть l_p

метчика разделена на заборную l_1 (режущую) и калибрующую l_2 . *Заборная часть* — это передняя конусная часть метчика, на долю которой приходится черновое нарезание резьбы. *Калибрующая часть* служит для окончательного формирования профиля резьбы.

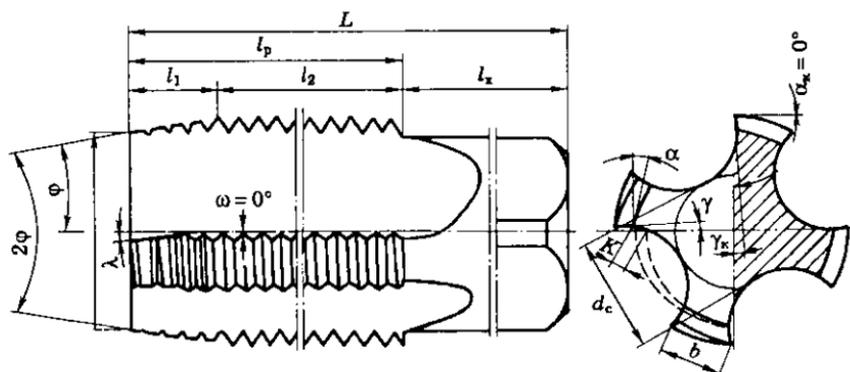


Рис. 6.6. Конструктивные элементы и геометрия метчика

Геометрия метчика определяется передним γ и задним α углами, углом заборной части ϕ и углом наклона винтовых каналов ω . Передний угол γ изменяется в широких пределах, $5 \dots 30^\circ$, и выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала и требуемой шероховатости нарезаемой резьбы. С увеличением переднего угла шероховатость нарезанной резьбы уменьшается, особенно при обработке пластичных материалов.

Задний угол α обеспечивается путем затылования. Средняя его величина составляет $\alpha = 6^\circ$. С увеличением заднего угла уменьшается прочность зуба и увеличивается вероятность заклинивания метчика стружкой при вывертывании из нарезанного отверстия. Наиболее распространенной кривой затылования задней поверхности является спираль Архимеда. На калибрующей части и боковых сторонах профиля задний угол обычно равен нулю. Только у метчиков со шлифованной резьбой его получают затылованием на резьбошлифовальном станке. Величина затылования K по ширине пера b на калибрующей части составляет всего $0,02 \dots 0,03$ мм.

Угол заборной части φ во многом определяет период стойкости T метчиков. Чем меньше φ , тем выше T . Например, если принять $T = 1$ при $\varphi = 45^\circ$, то $T = 2,5$ при $\varphi = 30^\circ$ и $T = 4$ при $\varphi = 15^\circ$. Однако величина угла φ ограничивается конструкцией детали. Так, при нарезании сквозных резьб метчик имеет $\varphi = 12...15^\circ$, резьб в жаропрочных сталях — $\varphi = 1^\circ 30'$, резьб в глухих отверстиях — $\varphi = 30...45^\circ$. Кроме того, с уменьшением угла φ увеличиваются расход инструментальной стали и длина заборного конуса. Последнее обстоятельство приводит к увеличению времени на врезание инструмента в деталь, а следовательно, и к снижению производительности. Наиболее рациональной длиной заборной части l_1 следует считать такую, когда $l_1 = 6R$.

С целью уменьшения сил трения и крутящего момента диаметр калибрующей части уменьшают по направлению к хвостовику. Это уменьшение обычно задается не углом $\varphi_1 = 2...5'$, а обратной конусностью, которая рекомендуется в пределах $0,05...0,1$ мм на 100 мм длины метчика. Если резьбу нарезают в легких сплавах, обратная конусность калибрующей части метчика составляет $0,2...0,3$ мм на 100 мм его длины.

При нарезании резьбы метчиками можно получить резьбу до степени точности 4Н...5Н. В целях улучшения отвода стружки метчики изготавливаются с винтовыми канавками, которые могут быть левого (для сквозных отверстий) (рис. 6.7, а) и правого (для глухих отверстий) (рис. 6.7, б) направления. Угол наклона канавок ω принимается в пределах $10...16^\circ$. У метчиков с прямыми канавками для обработки сквозных отверстий заборную часть достаточно часто затачивают под углом $\lambda = 7...10^\circ$ (рис. 6.7, в).

Форма заборной части метчика зависит от принятых схем профилирования и срезания припуска. У метчиков с генераторной схемой профилирования (рис. 6.8, а) резьба нарезана на

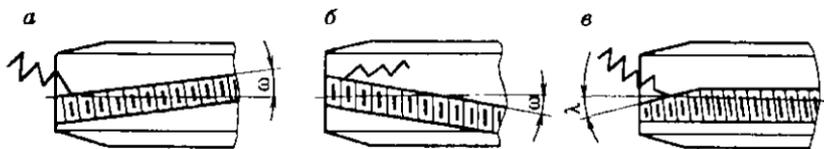


Рис. 6.7. Направление стружечных канавок

цилиндре. Заборная часть образуется затылованием конуса по наружной поверхности с углом φ . Основную работу выполняют главные режущие кромки ab , cd , ef , расположенные на образующей заборного конуса. Метчики с профильной схемой (рис. 6.8, б) на конусе заборной части имеют полнопрофильную, т.е. коническую, резьбу.

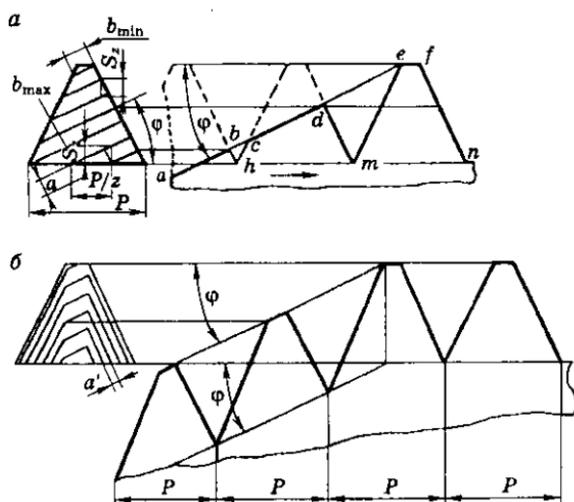


Рис. 6.8. Схемы профилирования и срезания припуска стандартизованными метчиками

6.4. Нарезание резьбы дисковыми и гребенчатыми фрезами

Резьбофрезерование осуществляется тремя видами резьбофрезерных фрез: дисковыми (одинарными), гребенчатыми (групповыми) и вращающимися резцовыми головками (вихревое нарезание).

Дисковые резьбовые фрезы имеют зубья, соответствующие профилю нарезаемой резьбы. По отношению к заготовке они

устанавливаются под углом τ (рис. 6.9, а), соответствующим углу подъема нарезаемой резьбы. Нарезание резьбы происходит за один проход. После настройки фрезы на глубину профиля резьбы h осуществляются следующие движения: главное — быстрое вращение фрезы v_ϕ , вспомогательное — медленное вращение заготовки (круговая подача S_0) и продольное перемещение фрезы или заготовки на шаг резьбы P . Каждый зуб фрезы срезает элемент ABC , где $BC = S_2$.

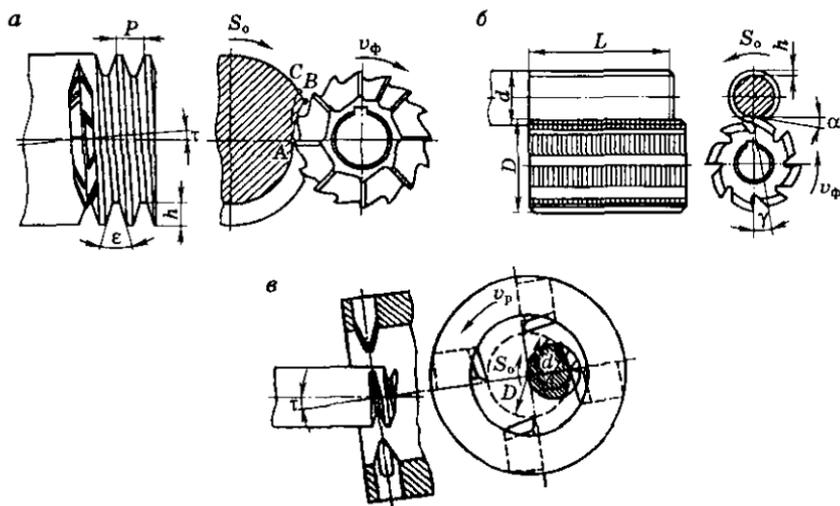


Рис. 6.9. Схемы резьбофрезерования

Гребенчатые фрезы (рис. 6.9, б) представляют собой заточенную фрезу с кольцевыми канавками, соответствующими профилю резьбы. Стружкоотводящие канавки бывают винтовыми или прямыми. Длина фрезы L должна быть на два-три шага больше длины нарезаемой заготовки. Нарезание как наружных, так и внутренних резьб осуществляется за счет радиальной врезной подачи на полную глубину профиля h с одновременным осевым перемещением фрезы на величину $S_{oc} = P$ и осевого перемещения на один шаг. После нарезания производится отвод фрезы в исходное положение. Используются такие фрезы для нарезания резьб небольшой длины, с небольшими шагом и углом подъема резьбы. Задний угол рекомендуется принимать в пределах $8...12^\circ$,

передний обычно принимают равным 0° . Если $\gamma \neq 0^\circ$, то необходим коррекционный расчет профиля.

В условиях обработки деталей на станках с ЧПУ и многоцелевых станках гребенчатые фрезы получают движения по определенным траекториям и используются для нарезания как наружных, так и внутренних резьб (рис. 6.10).

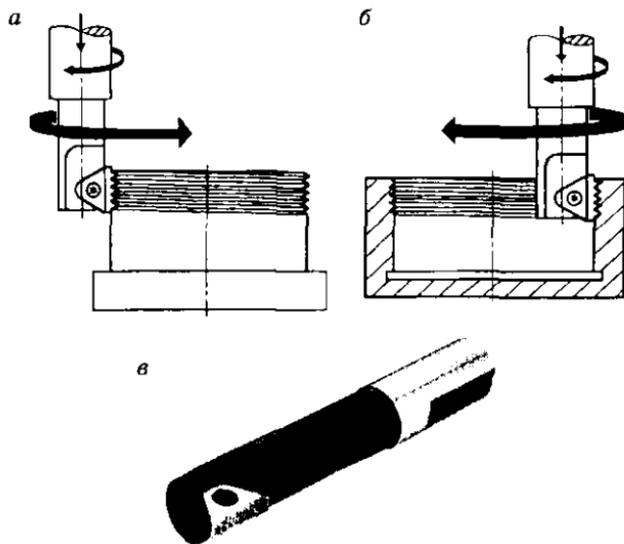


Рис. 6.10. Схемы нарезания наружной (а) и внутренней (б) резьб гребенчатой фрезой со сменной твердосплавной гребенкой (в)

Вращающаяся резцовая головка (обычно четырехрезцовая, рис. 6.9, в) устанавливается асимметрично по отношению к оси заготовки, которая крепится в центрах. Скорость вращения головки намного выше скорости вращения заготовки и составляет примерно 200...300 м/мин. Поэтому вихревое нарезание резьбы относится к скоростным методам. При соприкосновении с заготовкой резцы снимают серпообразную стружку. В головках обычно применяют резцы, оснащенные твердым сплавом. Круговые подачи на один резец головки изменяются от 0,4 до 1,2 мм (их следует уменьшать с возрастанием твердости материала заготовки). Ось головки, как и у дисковой резьбонарезной фрезы, наклонена к оси вращения нарезаемой детали на угол подъема резьбы τ .

Несмотря на более высокую производительность резьбонарезных фрез и резцовых головок, точность получаемой резьбы несколько ниже, чем при обработке резцом, и находится в пределах степеней точности 6Н...7Н.

6.5. Накатывание и раскатывание резьбы

Наиболее прогрессивным методом резьбообразования является накатывание резьбы, обеспечивающее наряду с высокой производительностью высокую прочность и износостойкость резьбовых поверхностей. Обработка резьбы накатыванием осуществляется копированием профиля накатного инструмента за счет вдавливания резьбы плашки или ролика в металл заготовки. При этом поверхность обработанной резьбы получается с уплотненными слоями и непрерывными волокнами, что способствует повышению прочности резьбовой детали.

Рассмотрим некоторые схемы накатывания наружных резьб с помощью различных инструментов. Наиболее широкое распространение в массовом производстве резьб на деталях из конструкционных сталей и цветных металлов получило накатывание резьб *плашками призматической формы*, имеющими развернутые витки резьбы на рабочих поверхностях (рис. 6.11, а). Формирование резьбы осуществляется в результате прокатывания заготовки 2 между подвижной 1 и неподвижной 3 плашками. Для обеспечения захвата заготовки и постепенного формирования резьбы одна, неподвижная, плашка или обе имеют заборную скошенную часть.

Накатывание резьб *затылованными роликами*, которые имеют заборную часть, выполненную по спирали Архимеда, калибрующую и сбрасывающую части (рис. 6.11, б), обеспечивает еще более высокую производительность обработки. Происходит это за счет того, что исключается возвратно-поступательное движение плоской плашки и ролики вращаются при неизменном межцентровом расстоянии.

Еще проще кинематика накатывания резьб *роликом и сегментной плашкой* (рис. 6.11, в). Ролик при своем вращении захватывает заготовки и прокатывает их по неподвижно закрепленной сегментной плашке.

В способе накатывания резьб *между вращающимся роликом и жестко закрепленным кольцом*, эксцентрично расположенным по отношению к ролику, создается заборная часть (рис. 6.11, г). По мере износа кольца его можно поворачивать на некоторый угол и использовать всю рабочую часть.

Общие недостатки накатных инструментов с заборной частью: трудоемкость изготовления и установки, сложность и продолжительность переналадки станков и невысокая точность накатанных резьб.

Этих недостатков лишен способ накатывания резьб *круглыми постепенно сближающимися роликами* (рис. 6.11, д, е), который обеспечивает низкое давление, высокую точность и малую

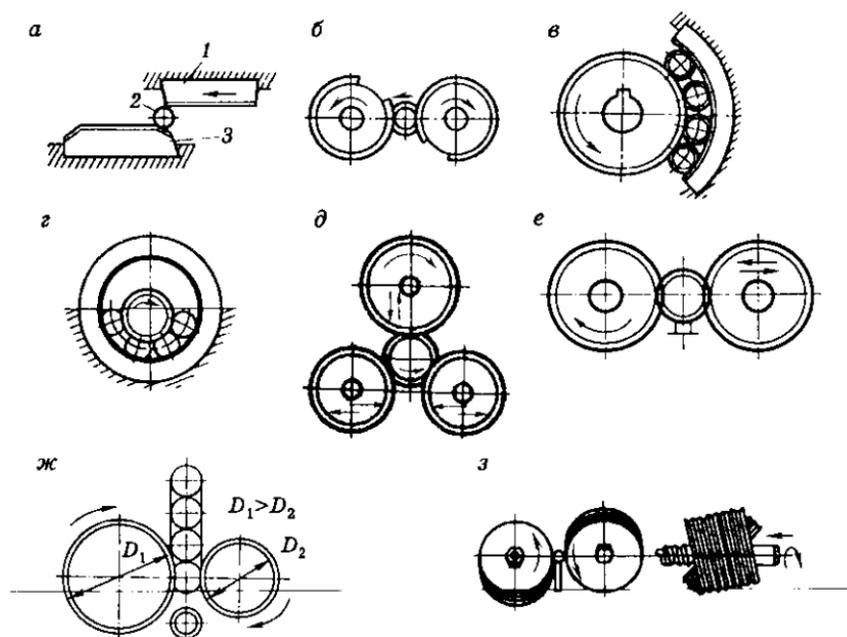


Рис. 6.11. Схемы накатывания наружных резьб

шероховатость поверхности резьбовых витков, надежность и простота наладки оборудования, возможность получения резьб на толкостенных деталях различных диаметров.

Накатывание резьбы *цилиндрическими роликами* может осуществляться и с тангенциальной подачей заготовки (рис. 6.11, ж). Ролики имеют разные диаметры и одинаковую частоту вращения; оси их занимают фиксированное положение. Вследствие разности линейных скоростей наружных рабочих поверхностей роликов происходит захватывание и перемещение заготовки со скоростью, пропорциональной разности окружных скоростей роликов. Способ этот весьма производителен и осуществляется на станках с очень простой кинематикой.

Накатывание длинных резьб или непрерывная обработка резьбы производится *цилиндрическими роликами с кольцевой нарезкой* при постоянном межосевом расстоянии (рис. 6.11, з). Оси роликов перекрещиваются под углом, соответствующим углу подъема накатываемой резьбы, за счет чего происходит осевое перемещение заготовки.

Более производительными при формировании резьбы являются *резьбонакатные головки*, у которых ролики в конце рабочего хода автоматически расходятся и витки плашек головки выводятся из зацепления с витками нарезанной резьбы без свинчивания. Головки работают по методу самозатягивания и обеспечивают получение резьб степеней точности 6Н, 7Н.

Внутренние резьбы малых размеров выполняются способом пластического деформирования с помощью *раскатников*, конструкция которых напоминает метчик без стружечных канавок (рис. 6.12). Они имеют заборную часть с конической резьбой. Калибрующая часть выполняется с цилиндрической резьбой. По всей рабочей части раскатника выполняется огранка для уменьшения сил трения.

Раскатники обладают более высокими прочностью и стойкостью по сравнению с метчиками. Однако они сложнее в изготовлении и требуют предварительной точной обработки отверстия.

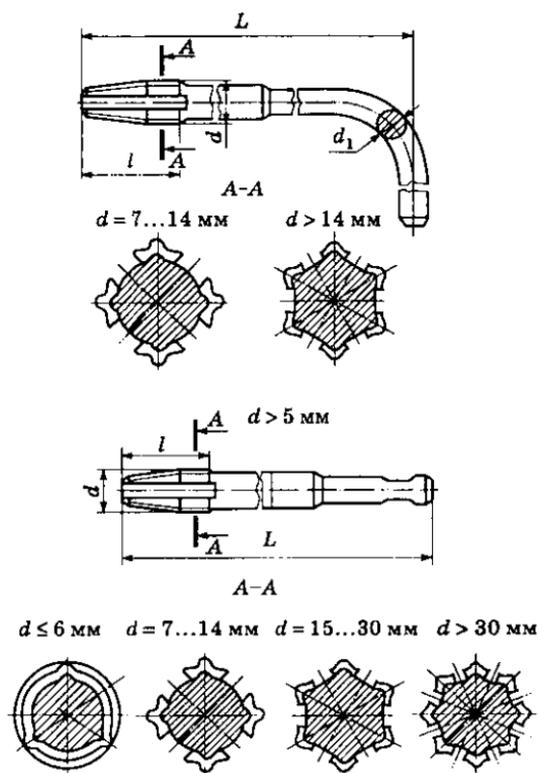


Рис. 6.12. Некоторые нормализованные конструкции раскатников

6.6. Конструкции и расчет резьбонарезных инструментов

В современных резьбовых резцах широко используются сменные неперетачиваемые пластины (рис. 6.13). Пластины могут работать как однониточные или многониточные резцы (рис. 6.14).

Крепление пластин в державках сборных резцов аналогично используемому в универсальных токарных резцах. Пластины

могут крепиться винтом, прижиматься клином к штифту, прижиматься прихватом и т.п. Сменные пластины выпускаются с уже сформированными задними и передними углами, иногда на передней поверхности может быть предусмотрен стружколом (рис. 6.14, *д*).

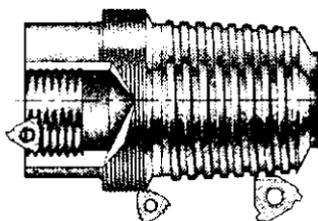


Рис. 6.13. Примеры нарезания резьб резцами со сменными неперетачиваемыми пластинами

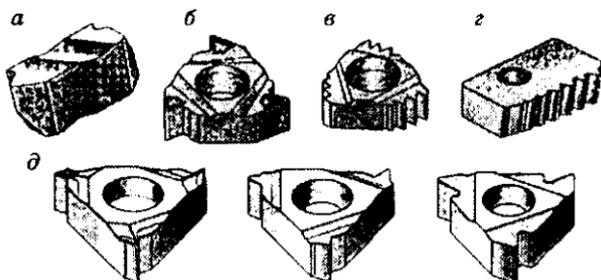


Рис. 6.14. Примеры сменных пластин для нарезания резьб:
а, б — однониточные; *в, г* — многониточные; *д* — оформление передней поверхности

Материал рабочей части машинных метчиков (быстрорежущая сталь или твердый сплав) определяется условиями его эксплуатации. Хвостовик изготавливают из сталей 45, 40Х. Для ручных метчиков используются углеродистые (У11, У11А) или легированные (9ХС) инструментальные стали. Твердость рабочей части метчиков диаметром менее 3 мм — 60...63 HRC, диаметром от 3 до 6 мм — 61...64 HRC, диаметром свыше 6 мм — 62...65 HRC.

Форма хвостовика предусматривает закрепление метчиков как в простых, так и в быстросменных патронах (рис. 6.15). Диаметр хвостовика метчиков $d > 12$ мм для обеспечения его свободного выхода из отверстия обрабатываемой детали принимается меньше внутреннего диаметра резьбы метчика на $0,25 \dots 1,5$ мм. С целью устранения поломок у мелких метчиков диаметр хвостовика делается толще или равным наружному диаметру метчика. В гаечных метчиках, работающих на гайконарезных автоматах, используются изогнутые хвостовики (рис. 6.16). Они не требуют периодического снятия гаек с хвостовика, так как последние непрерывно перемещаются вдоль метчика и на выходе спадают в бункер. Крутящий момент передается изогнутым хвостовиком.

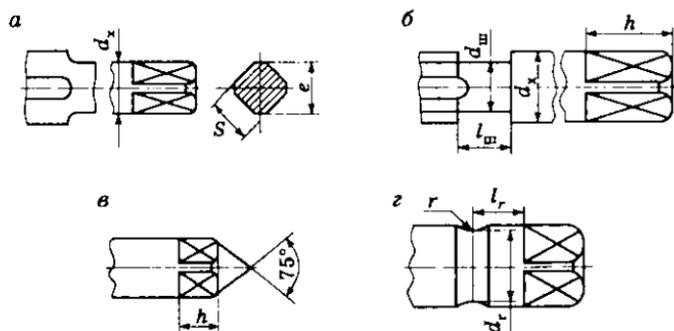


Рис. 6.15. Формы хвостовиков метчиков:
 а-в — для закрепления в простых патронах; г — для закрепления в быстросменных патронах

Общая длина метчика

$$L = l + l_0 + l_b + l'$$

где l — длина резьбового отверстия с полным профилем; l_0 — расстояние от вспомогательного инструмента до детали, принимаемое с учетом свободного выхода стружки от 10 мм и более в зависимости от диаметра метчика; l_b — длина вхождения метчика во вспомогательный инструмент; $l' = (1 \dots 3)P$ — величина выхода калибрующей части метчика из сквозного отверстия.

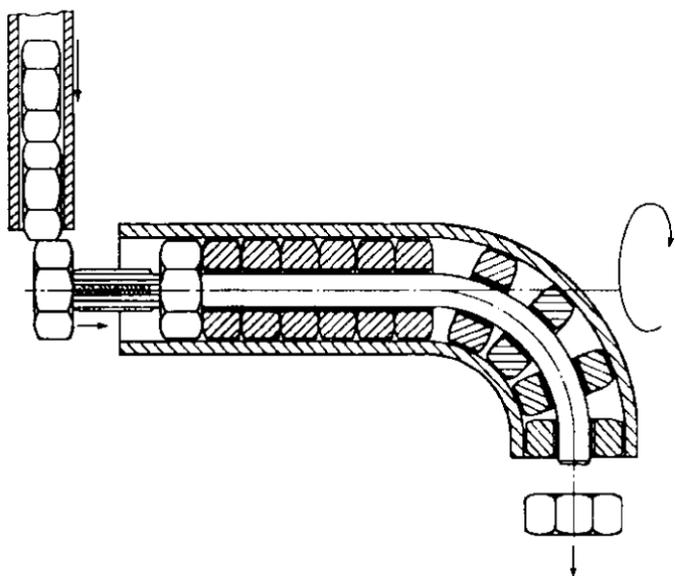


Рис. 6.16. Схема работы гаечного метчика с изогнутым хвостовиком

Диаметры, шаги и предельные отклонения профилей резьбы приведены в ГОСТ 17039–71 и ряде других стандартов. Число зубьев метчика выбирается в зависимости от обрабатываемого материала и диаметра резьбы.

Форма канавки должна обеспечивать свободное размещение стружки, содействовать ее легкому отводу, не допускать налипания и спрессовывания в канавке. Наиболее широко используется двухрадиусная форма канавки, для метчиков малых диаметров — однорадиусная. Профили фрез для стружечных канавок нормализованы, поэтому на чертеже метчика можно оговорить номер профиля фрезы.

При обработке особо вязких и прочных материалов (малоуглеродистые стали, жаропрочные стали и сплавы) необходимо уменьшать площадь соприкосновения резьбы метчика с заготовкой для предотвращения налипания частиц обрабатываемого материала, снижения сил трения и крутящего момента. Для этого используются метчики с шахматным расположением зубьев или витков. Схемы шахматного расположения зубьев метчиков приведены на рис. 6.17.

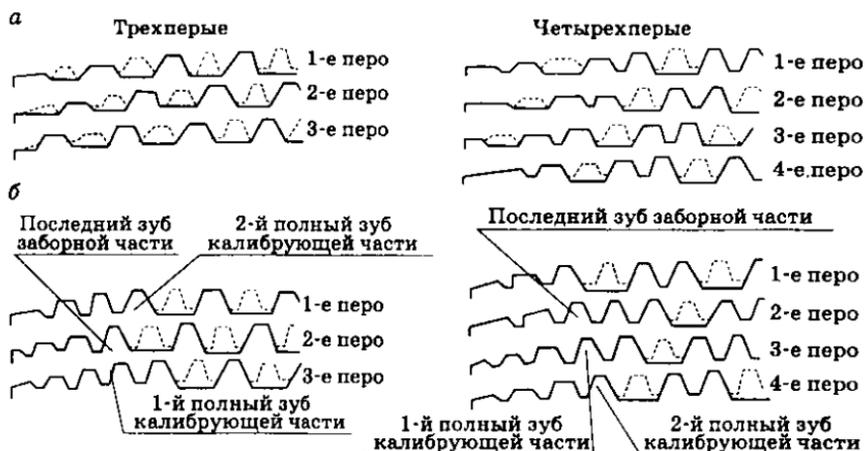


Рис. 6.17. Схемы шахматного расположения зубьев: а — при обработке сквозных отверстий; б — при обработке глухих отверстий

При высоких требованиях к точности и качеству резьбы используют метчики с бочкообразным профилем калибрующих зубьев (рис. 6.18). Благодаря дополнительному затылованию на K_1 контакт калибрующих зубьев метчика с поверхностью нарезаемой резьбы изменяется с поверхностного на линейный. Как следствие, снижаются трение и силы резания, уменьшается вероятность заклинивания метчика в отверстии.

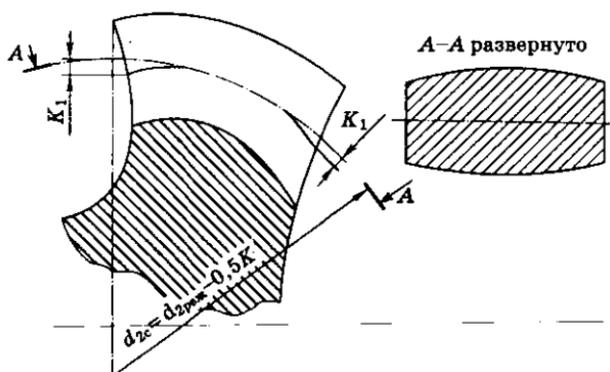
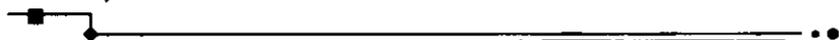


Рис. 6.18. Бочкообразный зуб метчика

Размеры профиля резьбы метчика и поля их допусков определяются соответствующими значениями нарезаемой резьбы. Номинальные размеры профиля метчика и гайки при этом одинаковы, а допуски назначаются по соответствующим стандартам в зависимости от конструкции метчиков — машинно-ручных, машинных с винтовыми канавками, гаечных и др., а также от степени точности резьбы в гайке.

6.7. Расчет режимов резания при нарезании резьбы



Глубина резания и подача. При нарезании резьбы резцами глубина резания t равна глубине профиля (при обработке за один проход) либо ее части, соответствующей принятому числу проходов i . В соответствующих разделах справочников приведены также рекомендуемые подачи для фрез разных типов.

Подача при нарезании резьбы резцом равна шагу резьбы ($S_0 = P$). Подача S_z на зуб дисковой фрезы принимается в пределах 0,03...0,06 мм в зависимости от точности резьбы. Метчики, плашки, резьбонарезные головки работают с самозатягиванием (самоподачей).

Силы и мощность резания. Главную составляющую силы резания для твердосплавных резьбовых резцов можно определить по формуле

$$P_z = \frac{C_{P_z} P^{u_{P_z}}}{i^{n_{P_z}}} K_{1P}, \dots, K_{iP},$$

где C_{P_z} , u_{P_z} , n_{P_z} — коэффициент и показатели степени, характеризующие общие условия нарезания резьбы и свойства обрабатываемого материала; i — количество проходов резца; P — шаг резьбы; K_{1P}, \dots, K_{iP} — поправочные коэффициенты, учитывающие условия резьбонарезания.

Мощность резания определяется аналогично мощности универсальных токарных резцов.

Крутящий момент при нарезании резьбы метчиками, плашками резьбонарезными головками равен

$$M = C_M D^{q_M} P^{y_M} K_{1M}, \dots, K_{iM},$$

где C_M , q_M и y_M — коэффициент и показатели степени, характеризующие общие условия нарезания резьбы и свойства обрабатываемого материала; D — диаметр резьбы; P — шаг резьбы; K_{1M}, \dots, K_{iM} — поправочные коэффициенты, учитывающие условия резьбонарезания.

Мощность резания в этом случае рассчитывается по формулам, используемым для расчета мощности при сверлении и зенкерении.

Скорость резания. При нарезании резьбы твердосплавными резцами скорость резания вычисляют по формуле

$$v = \frac{C_v i^{x_v}}{T^m P^{y_v}} K_{1v}, \dots, K_{iv},$$

где C_v , x_v и y_v — коэффициент и показатели степени, характеризующие общие условия нарезания резьбы и свойства обрабатываемого материала; T — принятый период стойкости резца; m — показатель относительной стойкости резца; i — количество проходов резца; P — шаг резьбы; K_{1v}, \dots, K_{iv} — поправочные коэффициенты, учитывающие условия резьбонарезания.

Значения C_v , x_v , y_v , m и поправочных коэффициентов приводятся в справочной литературе.

Скорость резания при нарезании метрической резьбы метчиками, плашками или резьбонарезными головками рассчитывается по формуле

$$v = \frac{C_v d^{q_v}}{T^m P^{y_v}} K_{1v}, \dots, K_{iv},$$

а при нарезании гребенчатыми фрезами — по формуле

$$v = \frac{C_v}{T^m S_z^{x_v} P^{y_v}} K_{1v}, \dots, K_{iv}.$$

Постоянные C_v , коэффициенты и показатели степени, а также рекомендуемые периоды стойкости приведены в справочной литературе.

Износ метчиков происходит по задней поверхности зубьев заборной части. При обработке ряда материалов наблюдаются выкрашивания, а иногда и сколы на режущих кромках, налипы на витках резьбы. Стойкость метчиков при обработке конструкционных сталей и чугунов составляет 0,5...3 ч в зависимости от диаметра резьбы. При обработке труднообрабатываемых материалов стойкость обычно оценивается по числу отверстий, нарезанных до отказа метчика.

Скорость резания устанавливают, имея в виду, что качественная резьба может быть получена нарезанием плашками со скоростью не более 4 м/мин, а резьбонарезными головками — не более 14...16 м/мин. Наиболее производительное и экономичное нарезание резьбы метчиками и гребенчатыми фрезами обеспечивается при максимальных скоростях резания, допускаемых оборудованием и свойствами используемого инструментального материала.

Основное время при нарезании резьбы резцом равно

$$T_o = \frac{L}{P} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{x.x}} \right) ik,$$

где L — длина рабочего хода, мм; P — шаг резьбы; n — рабочая частота вращения шпинделя; $n_{x.x}$ — частота вращения шпинделя при обратном ходе резца; обычно $n_{x.x} = (1,5...3)n$; i — количество проходов резца; k — число заходов резьбы.

Длина рабочего хода $L = l + l_1 + l_2$, где l — длина резьбы; l_1, l_2 — длины врезания и перебега соответственно.

Длины врезания и перебега определяются по таблицам справочников или используя зависимости:

- при обработке на проход $l_1 + l_2 = (3...4)P$ — для резцов из быстрорежущей стали, $l_1 + l_2 = (3...4)P$ — для резцов из твердого сплава;
- при обработке в упор $l_1 + l_2 = 3P$.

Основное время при нарезании резьбы метчиком равно

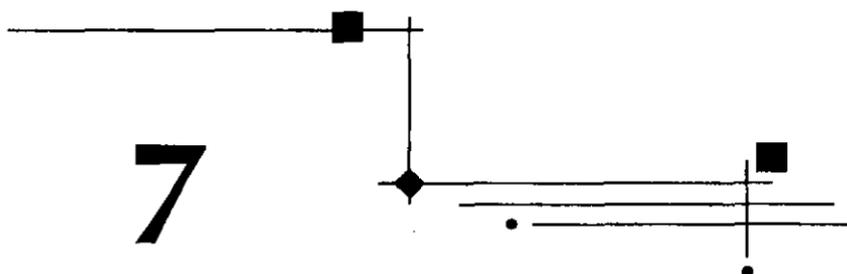
$$T_o = \frac{L}{P} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{x.x}} \right),$$

где длины врезания и перебега при работе на проход $l_1 + l_2 = (6...12)P$; при работе в упор $l_1 + l_2 = (2...6)P$.

Основное время при нарезании резьбы гребенчатой фрезой

$$T_0 = \frac{1,2 \pi d}{S_z z n},$$

где d — диаметр детали; S_z — подача на зуб фрезы; z — число зубьев фрезы; n — частота вращения фрезы.



ЗУБОНАРЕЗАНИЕ

7.1. Нарезание зубчатых колес по методу копирования



При изготовлении зубчатых колес инструментами, работающими по методу копирования, используют дисковые и пальцевые модульные фрезы, резцы головок контурного зубодолбления, протяжки и др. Инструменты этого вида относятся к инструментам специального назначения, поскольку для нарезания колес одного модуля, но с различным числом зубьев требуется отдельный инструмент.

Дисковые и пальцевые модульные фрезы работают при наличии делительных устройств, обеспечивающих поворот заготовки на один зуб после обработки впадины зуба. *Дисковые модульные фрезы* (рис. 7.1, а) представляют собой фасонную фрезу с зубьями, затылованными по спирали Архимеда в радиальном направлении. Передний угол γ у этих фрез равен нулю, что ухудшает условия резания. Однако такая геометрия уменьшает погрешности в профиле зубьев колес после переточек фрез. Кроме того, упрощается проектирование инструмента.

Задние углы на вершине принимаются равными $10...15^\circ$. Боковые задние углы при этом составляют $1...2^\circ$, но в некоторых случаях применяют специальные фасонные фрезы с увеличенными до $5...6^\circ$ значениями этих углов.

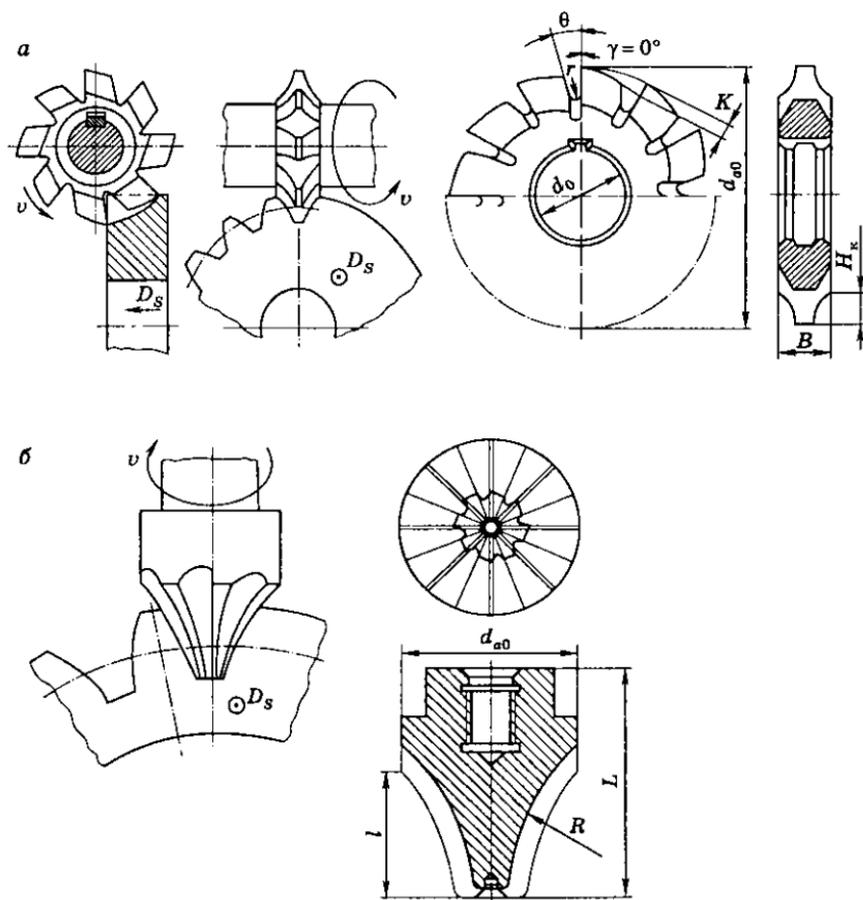


Рис. 7.1. Схемы работы и конструктивные элементы фасонных модульных фрез

Координаты точек профиля этих инструментов определяют в прямоугольной системе координат по формулам, приведенным в литературе.

Дисковые фрезы изготавливают наборами из восьми (А) или пятнадцати (Б) штук каждого модуля. В наборе фрезы обозначают номерами, так как они имеют различную форму профиля в зависимости от числа зубьев нарезаемого колеса (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Комплектация дисковых зуборезных фрез

Номер фрезы	Число зубьев нарезаемого колеса в наборе		Номер фрезы	Число зубьев нарезаемого колеса в наборе	
	А	Б		А	Б
1	12...13	12	5	25...34	26...29
1 1/2	—	13	5 1/2	—	30...34
2	14...16	14	6	35...54	35...41
2 1/2	—	15, 16	6 1/2	—	42...54
3	17...20	17, 18	7	55...134	55...79
3 1/2	—	19, 20	7 1/2	—	80...134
4	21...25	21, 22	8	135 и более	135 и более
4 1/2	—	23...25			

Пальцевые модульные фрезы (рис. 7.1, б) соответствуют по конструкции концевым фрезам, имеющим фасонный профиль режущих кромок. При работе ось фрезы устанавливается симметрично впадине нарезаемого колеса, размеры которой определяют габариты фрезы. Число зубьев невелико — 4–8. Обычно фрезы крепят с помощью резьбового соединения, базируя их по точно выполненному посадочному пояску на посадочной части шпинделя станка. Применяют их при нарезании колес с модулем $m = 10...50$ мм с прямыми, винтовыми и шевронными зубьями.

Пальцевые модульные фрезы изготавливают с затылованными зубьями. Переточку проводят по плоской передней поверхности, проходящей через ось фрезы. Для обеспечения благоприятных задних углов вдоль всей режущей кромки, повышающих период стойкости инструмента, затылование осуществляют под углом $10...15^\circ$ к оси фрезы.

Оценивая нарезание зубьев по методу копирования пальцевыми и дисковыми модульными фрезами, следует отметить общие недостатки: низкая точность обработки, малая производительность и необходимость иметь наборы инструментов для каждого модуля из 8, 15 или 26 фрез.

Такие инструменты, как головки контурного зубодобления, протяжки для обработки колес внутреннего и наружного про-

филя, работающие по методу копирования, обеспечивают очень высокую производительность зубонарезания. Они проектируются для обработки колес с определенным числом зубьев.

Головки для контурного зубодолбления (рис. 7.2, а) обеспечивают одновременное нарезание всех впадин обрабатываемого зубчатого колеса. Режущими элементами являются фасонные резцы 3, имеющие форму профиля впадины прямозубого цилиндрического колеса. Резцы (рис. 7.2, б), установленные в радиальных пазах корпуса или разводящего кольца 1, после каждого рабочего хода отводятся, а затем в начале рабочего хода заготовки 4 подаются в радиальном направлении с помощью сводящего кольца 2 и при рабочем движении заготовки производят долбление впадин.

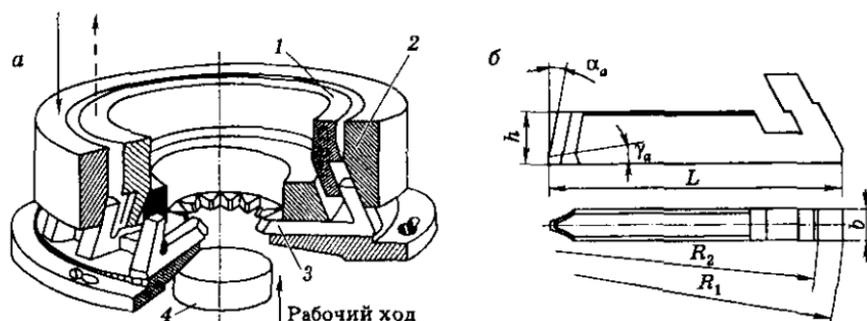


Рис. 7.2. Головка для контурного зубодолбления:
а — общий вид; б — долбежный резец

Несмотря на сложность конструкции, головки контурного зубодолбления могут применяться в массовом производстве, так как обеспечивают высокую производительность процесса нарезания зубчатых прямозубых колес.

Краткие сведения о протяжках для обработки профилей зубчатых колес приведены в гл. 5.

7.2. Нарезание зубчатых колес по методу обкатки

Кинематику работы обкатных зуборезных инструментов определяет наличие сложного обкатного движения режущих кромок инструмента относительно обрабатываемых поверхностей заготовки (рис. 7.3). Это движение обеспечивает непрерывное изменение положения инструментальной поверхности, образуемой режущими кромками инструмента в процессе главного движения, относительно обрабатываемой поверхности заготовки.

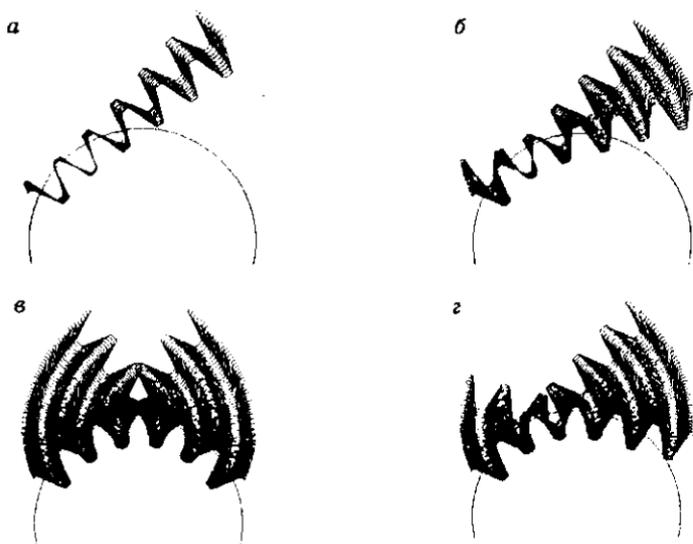


Рис. 7.3. Компьютерная симуляция образования впадины заготовки по методу обкатки (рейка огибает колесо)

Обработка зубчатых деталей *червячными фрезами* по методу обкатки является точным и высокопроизводительным методом. Зубофрезерованием можно обрабатывать детали с различными профилями. Процесс образования червячной фрезой профиля

зубьев колеса аналогичен процессу зацепления колеса с червяком (рис. 7.4). Заготовка вращается вокруг своей оси. Чтобы обработать зуб по всей высоте детали, фреза кроме вращательного движения получает и поступательное перемещение вдоль заготовки. Профиль впадины (зуба) изделия образуется последовательным вырезанием металла каждым зубом фрезы (см. рис. 7.3). Для придания режущих свойств основному (незатылованному) червяку на нем прорезают продольные винтовые канавки, равномерно расположенные по торцу. Поверхность пересечения винтов основного червяка и стружечной канавки (рис. 7.5) является передней поверхностью, а линия пересечения — режущей кромкой фрезы. Для обеспечения необходимых задних углов и сохранения профиля инструмента после переточек на червяке создается затылованная задняя поверхность. Форма ее обеспечивается кривой затылования — спиралью Архимеда, дугой окружности, прямой и т.д.

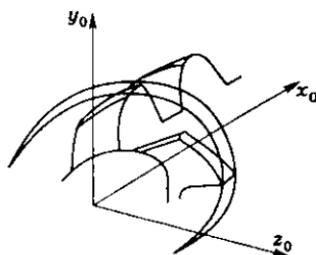
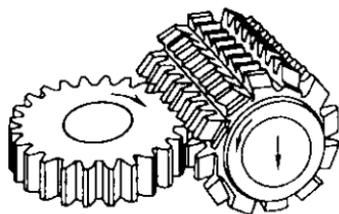


Рис. 7.4. Схема зубонарезания червячной фрезой

Рис. 7.5. Схема образования режущих лезвий фрезы

Нарезание червячных колес осуществляют с тангенциальной (рис. 7.6, а) или радиальной (рис. 7.6, б) подачей. В последнем случае необходимо выдержать с высокой точностью межцентровое расстояние a_{02} . Фрезы с тангенциальной подачей имеют заборный конус с $\varphi = 11...13^\circ$ на длине $l_{заб} = 2,5 - 3$ шага, что позволяет уменьшить нагрузки на первые зубья фрезы, вступающие в контакт с заготовкой. Их высота $h' = (0,8...0,9)h$, где h — полная высота зубьев (рис. 7.6, в). Достижимая точность межцентрового расстояния a_{02} при работе фрез с тангенциальной подачей значительно выше, чем при обработке червячных колес фрезами с радиальной подачей.

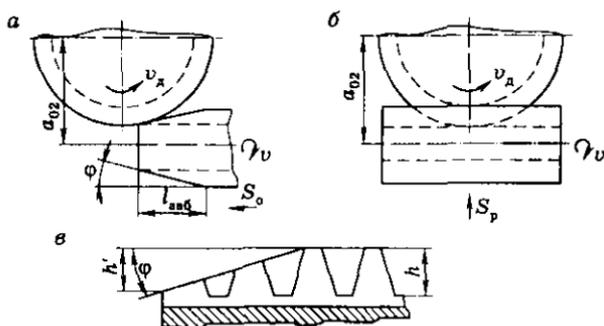


Рис. 7.6. Схемы нарезания червячных колес

Червячные фрезы с соответствующим профилем используются также для нарезания шлицевых валиков с прямобочным, звольвентным, треугольным профилем, а также звездочек втулочно-роликовых передач. При соответствующем расчете профиля фрезы можно нарезать зубчатые профили произвольно заданной формы.

Зуборезные гребенки являются самыми простыми инструментами, которые больше других соответствуют основной инструментальной рейке. Они представляют собой рейку, снабженную передними и задними углами, которая в процессе обкатки с заготовкой совершает возвратно-поступательные движения, необходимые для резания (рис. 7.7). Применяются на зубодолбежных станках для нарезания точных колес наружного зацепления с прямыми, винтовыми и шевронными зубьями.

Зуборезные долбяки (рис. 7.8) распространены гораздо шире гребенок. Червячные фрезы в общем случае являются более производительными ин-

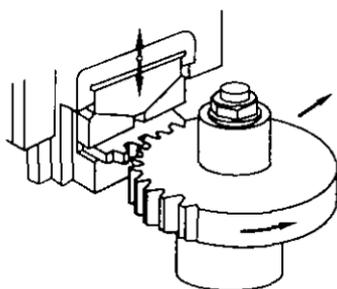


Рис. 7.7. Схема нарезания зубьев зубчатой рейкой

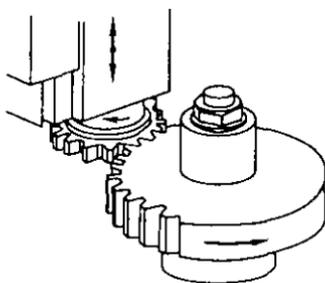


Рис. 7.8. Схема нарезания зубьев долбяком

струментами по сравнению с долбяками. Поэтому при изготовлении точных зубчатых колес зубодолбление заменяют зубофрезерованием с последующим шевингованием зубчатых колес. Однако долбяки являются наиболее универсальным из зуборезных инструментов. Обработка внутренних зубчатых, шевронных и блочных колес, зубчатых секторов эффективно обеспечивается только зубодолблением.

Существует несколько классификаций долбяков:

1) в зависимости от *характера обрабатываемых деталей*:

- прямозубые — для нарезания прямозубых колес;
- косозубые — для нарезания колес с винтовым зубом и шевронных колес;
- специальные — для нарезания зубчатых деталей с произвольным фасонным профилем.

2) в зависимости от *конструкции*:

- дисковые — для обработки наружных и внутренних колес большого диаметра (рис. 7.9, а);
- хвостовые — для колес внутреннего зацепления малого диаметра (рис. 7.9, б);
- чашечные — для нарезания блоков зубчатых колес, когда долбление производится в упор и использование дискового долбяка невозможно (рис. 7.9, в).

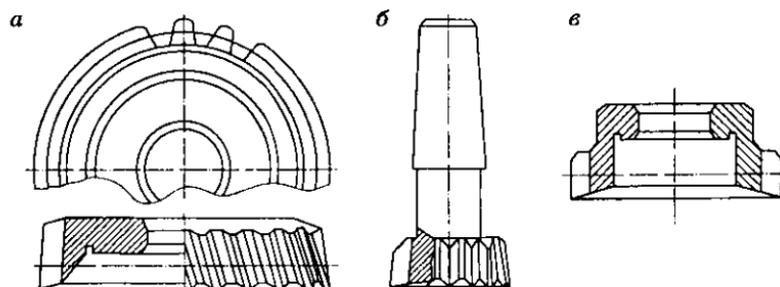


Рис. 7.9. Типы долбяков в зависимости от конструкции

Дисковый и чашечный долбяки на штосселе зубодолбежного станка крепятся гайкой, базирясь по отверстию и внешнему базовому торцу. Гайка и резьбовой конец штосселя станка при использовании дисковых долбяков могут препятствовать обработке блоков колес. В этом случае применяют чашечные долбяки, у которых имеется выемка для размещения крепежной гайки.

Метод *зубошевингования* основан на принципе зацепления зубчатых колес с перекрещивающимися осями. На боковых сторонах зубьев шеверов всех типов делают канавки вдоль профиля зубьев для образования режущих кромок. Шеверы применяют для чистовой обработки прямозубых и косозубых колес наружного и внутреннего зацепления после предварительного их нарезания. При взаимном перемещении шевера и колеса в ходе обработки режущие кромки «соскабливают» с поверхности зубьев колеса тонкие стружки. При этом повышается точность зубчатых колес, снижается шероховатость боковых сторон зубьев и уменьшается шум при работе зубчатых колес. Шевингование при нормальных условиях обработки обеспечивает точность колес 5–6-й степени и шероховатость боковых сторон зубьев до $Ra = 0,63$ мкм.

По конструкции различают реечные, червячные и дисковые шеверы (рис. 7.10). Червячные шеверы применяются для обработки червячных колес, а реечные и дисковые — цилиндрических.

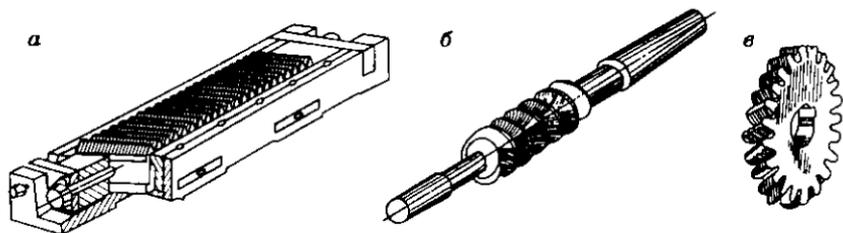


Рис. 7.10. Типы шеверов:
а — реечный; б — червячный; в — дисковый

7.3. Расчет и конструирование зуборезных инструментов

Червячные фрезы. Червячные фрезы широко применяются для чернового, получистового и чистового нарезания прямо- и косозубых цилиндрических зубчатых колес в диапазоне модулей 0,1...40,0 мм. Существует следующая классификация червячных фрез:

- по способу соединения со станком — *насадные* и *хвостовые*. Наибольшее распространение получили насадные фрезы, а хвостовые применяются только в случае, когда небольшой диаметр не позволяет выполнить ее насадной (характерно для червячных фрез, применяемых для нарезания червячных колес);

- по направлению витков — *правозаходные* и *левозаходные*, а по числу витков (заходов) — *однозаходные* и *многозаходные* (два, три, иногда четыре захода);

- по конструкции — *цельные* (выполненные из цельной заготовки), *составные* и *сборные* (из инструментального материала изготавливаются только зубья). Цельные фрезы получили широкое распространение, так как характеризуются большим разнообразием типов, подразделяемых по назначению (одно- и многозаходные, черновые, чистовые), размерам (короткие, длинные, увеличенного диаметра), точности изготовления и др.

Фрезы с рабочей частью из стали Р6М5 или 10Р6М5 используются при обработке углеродистых и легированных конструкционных сталей, а из сталей Р9К10, Р6М5К5 и др. — для обработки высокопрочных труднообрабатываемых материалов. Твердость цельных фрез из быстрорежущих сталей и зубчатых реек сборных фрез — 62...65 HRC при использовании вольфрамовых и вольфрамомолибденовых быстрорежущих сталей и 63...66 HRC при использовании кобальтовых и ванадиевых сталей. В сборных и составных червячных фрезах применяются твердые сплавы ВК6-М, ВК8, ВК10-ОМ, Т5К10 и др.

В зависимости от назначения и размеров червячные фрезы изготавливаются классов точности ААА, АА, А, В, С и D и рекомендуются соответственно для нарезания зубчатых колес 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11-й степеней точности.

Корпуса сборной фрезы имеют продольные пазы, в которых крепятся режущие рейки или одиночные зубья.

Рейки в пазах крепят различными способами:

- продольными клиньями (рис. 7.11, а, б);
- торцовыми гайками с конической зажимной частью (рис. 7.11, в);

- ~~• торцовыми винтами и прокладками для крепления отдельных~~ —
• торцовыми винтами и прокладками для крепления отдельных зубьев в пазах корпуса (рис. 7.11, г);

- с помощью клиновой части реек для крупномодульных фрез (рис. 7.11, д).

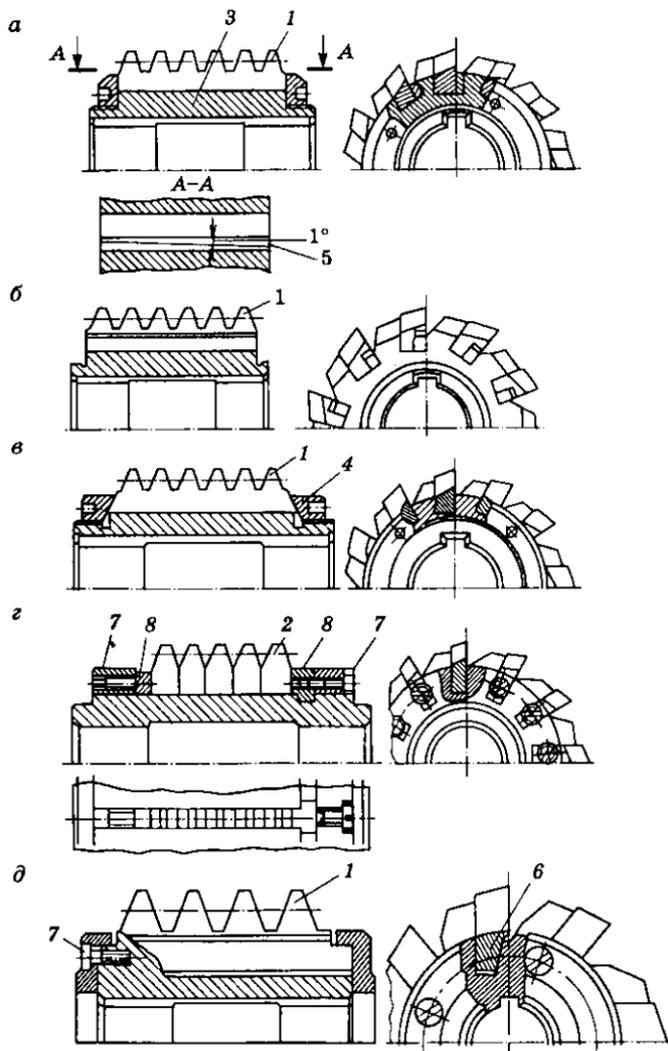


Рис. 7.11. Примеры сборных конструкций червячных фрез:
 1 — плоская рейка; 2 — нож; 3 — корпус; 4 — гайка; 5 — клин;
 6 — клиновидная рейка; 7 — винт; 8 — прокладка

До операции финишной обработки изготавливаются составные части фрезы (корпус, зубчатые рейки, крышки), а затем осуществляется их сборка. После этого фреза обрабатывается как монолитная конструкция и последующей разборке уже не подлежит.

Используются также сборные червячные модульные фрезы со сменными *неперетачиваемыми* пластинами (рис. 7.12). Фрезы состоят из корпуса 1 с винтовой нарезкой, винтовых секторов 2 и комплекта сменных пластин 3, расположенных вдоль контура фрезы в местах размещения активных режущих кромок. Цельные

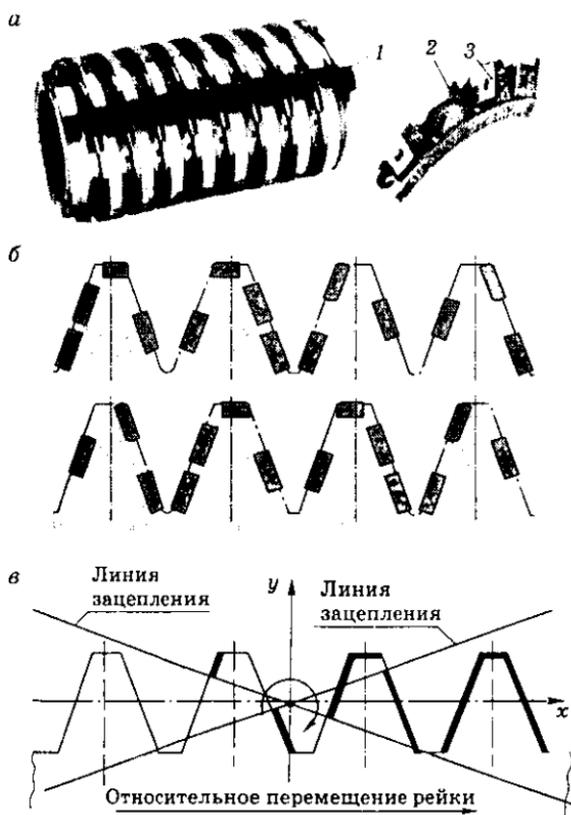


Рис. 7.12. Конструктивные элементы сборной червячной фрезы со сменными пластинами (а), схема их расположения на рейках (б) и места размещения активных частей режущих кромок (в)

червячные фрезы и рейки сборных фрез выполняются затылованными. Цельные фрезы имеют двойное затылование и шлифованный рабочий профиль зуба (рис. 7.13). Нешлифованная часть затылуется с помощью кулачка, спад которого K_1 в 1,2–1,5 раза больше спада кулачка K , используемого для шлифованной части профиля зуба. Длина шлифованной части составляет примерно $2/3$ ширины зуба B . Положение шлифовального круга относительно зуба фрезы в конце цикла затылования показано на рис. 7.14.

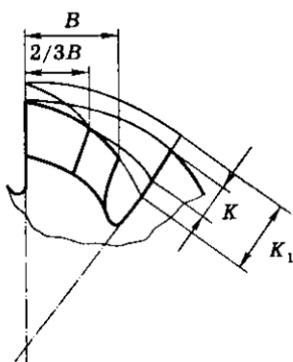


Рис. 7.13. Форма задней поверхности зуба червячной фрезы

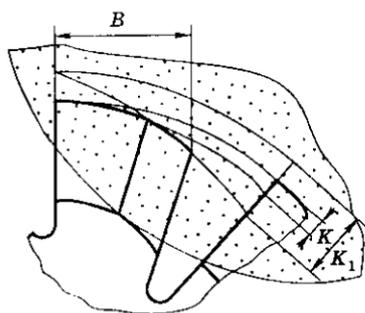


Рис. 7.14. Схема шлифования затылованной задней поверхности зуба червячной фрезы

Последовательность расчета червячной фрезы приведена в литературе.

Долбяки. В основу изготовления рабочей части долбяков положена шестерня, заточенная на конус как по торцу (передняя поверхность), так и по периферии (задняя поверхность), за счет чего образуются углы при вершине γ_a и α_a (рис. 7.15). Боковые стороны зубьев шлифуются по эвольвенте, чтобы при переточках по передней поверхности форма зуба не изменялась. Эвольвентные боковые поверхности образуются путем винтового движения эвольвенты по направляющему цилиндру, диаметр которого является диаметром основной окружности. Благодаря этому в любом сечении долбяка, перпендикулярном к его оси, получаются одинаковые эвольвенты. Причем на одной стороне зуба винтовая поверхность делается правой, а на другой — левой (обеспечивается наличие на боковых сторонах зуба задних боковых углов).

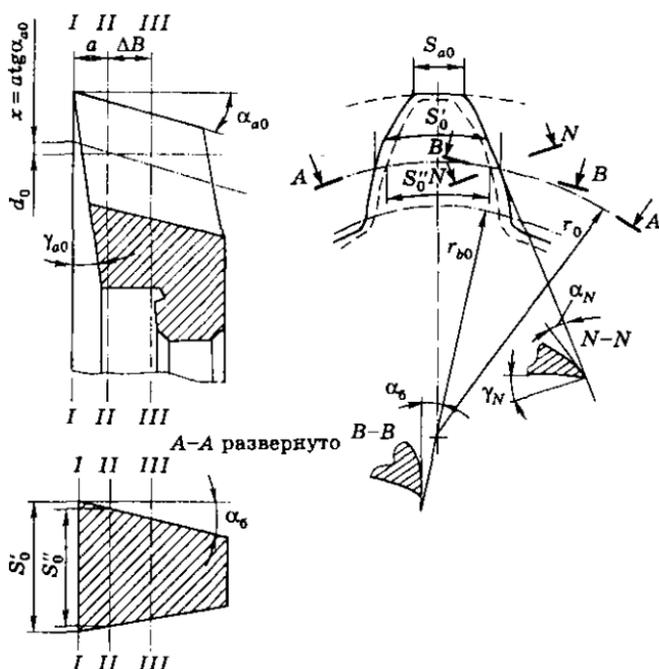


Рис. 7.15. Геометрические параметры долбьяка

Таким образом, из геометрических параметров долбьяка рассматривают задние и передние углы на вершине и боковых сторонах профиля его зубьев в трех сечениях. Задний угол на вершине α_a определяет интенсивность изменения смещения исходного контура по длине зуба. Он функционально связан с задним углом $\alpha_{6л}$ на боковых сторонах долбьяка и углом зацепления $\alpha_{t_{w0}}$ и определяет фактический зазор между задней боковой поверхностью в данной точке лезвия зуба и плоскостью резания.

Размеры зубьев долбьяка зависят от исходного контура инструментальной рейки, который занимает изменяемое положение по длине зубьев долбьяка с различным его смещением. Сечение *I-I* находится в плоскости переднего торца, сечение *III-III* в плоскости, близкой к опорному торцу, сечение *II-II*, в котором коэффициент смещения исходного контура $x = 0$, называют *исходным* или *расчетным* (обычно расположено между сечениями *I* и *III*).

В сечении *I-I* (см. рис. 7.15) смещение положительное ($x > 0$), средняя линия исходной инструментальной рейки отстоит на определенную величину от делительной окружности долбяка и не совпадает с начальной прямой. В сечении *II-II* коэффициент смещения $x = 0$, средняя линия инструментальной рейки совпадает с начальной прямой. В сечении *III-III* при $x < 0$ средняя линия инструментальной рейки приближается к оси долбяка: профиль зубьев долбяка образуется при положении начальной прямой, отличном от средней линии рейки, точка касания профилей зубьев рейки и долбяка приближается ко дну впадины зубьев рейки, толщина зуба по дуге делительной окружности уменьшается, а толщина зуба по окружности вершин увеличивается по сравнению с толщинами в исходном сечении.

Диаметры посадочных отверстий долбяков отличны от стандартизованных диаметров отверстий насадных инструментов, их размеры устанавливаются в соответствии с размерами посадочных мест станков: 20; 31,75; 44,45; 88,9; 101,6 мм с допуском Н4 или точнее.

Для крепления хвостовых долбяков применяют конус Морзе укороченный В18, В24.

Методика расчета долбяка приведена в литературе.

Для нарезания колес больших модулей применяются *сборные* и *составные* конструкции долбяков, а при обработке колес из труднообрабатываемых материалов могут использоваться долбяки, зубья которых оснащены *твердым сплавом*. Пластины либо припаивают на каждый зуб (рис. 7.16, а), либо закрепляют механически (рис. 7.16, б). При этом зубья 1 из твердого сплава крепятся на корпусе 3; для центрирования зубьев из твердого сплава по отношению к зубьям корпуса используют специальный сепаратор 2.

С целью повышения производительности процесса зубодолбления и достижения высокого качества обработанных поверхностей можно применять *ступенчатые долбяки*, которые состоят из двух-трех долбяков, установленных на одной оправке. Нижний долбяк осуществляет черновую обработку, а верхний — чистовую (рис. 7.16, в).

Повышению производительности зубодолбления способствует также применение *сегментных долбяков* (рис. 7.16, г), которые

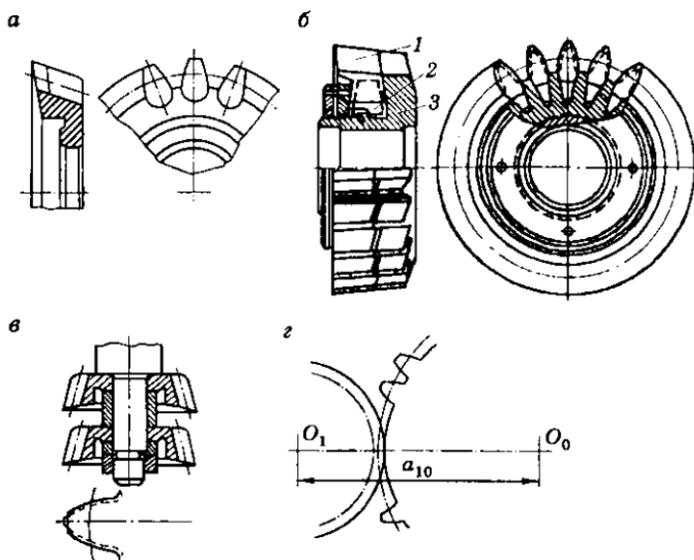


Рис. 7.16. Виды долбяков:

а — составной с напаянными твердосплавными пластинами; *б* — сборный с твердосплавными зубьями; *в* — ступенчатый; *г* — сегментный

работают без процесса врезания. У них удалено несколько зубьев, что позволяет вести обработку без радиальной подачи, предварительно установив требуемое межосевое расстояние между долбяком и заготовкой.

Шеверы. Усовершенствование конструкций шеверов и методов шевингования идет по пути повышения режущих свойств, стойкости и работоспособности инструмента, а также упрощения кинематики станка, снижения времени и трудоемкости обработки.

Режущие свойства можно повысить за счет создания *составных* и *сборных конструкций шеверов*, оснащенных твердыми сплавами, алмазами и композитами, закрепленных на корпусе пайкой, клиньями или винтами (рис. 7.17, *а, б*). Однако в связи со сложностью их изготовления на практике такие шеверы широкого применения не получили.

Для обработки закаленных колес, снятия заусенцев незаменимы шеверы составной конструкции с режущим слоем из абра-

живных, алмазных и композиционных материалов, нанесенных на металлические зубья корпуса (рис. 7.17, в).

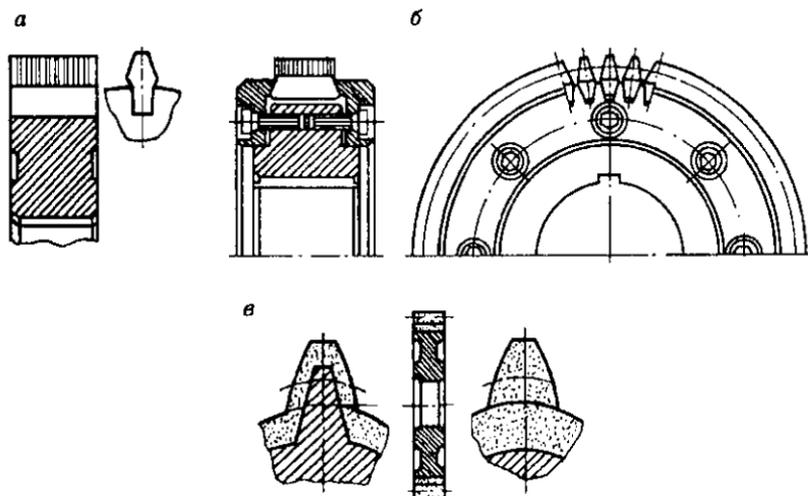


Рис. 7.17. Шеверы твердосплавные и алмазные

Для сокращения времени на обработку применяют *однопроходные шеверы* и *шеверы с измененным направлением подачи*. У однопроходных шеверов зубья на $2/3$ их длины равномерно уменьшаются по толщине, образуя режущую часть. Уменьшение толщины зубьев должно быть больше припуска на шевингование. На остальной длине зубья имеют нормальный требуемый размер и исполняют роль калибрующей части. При работе таких шеверов не требуется сближения осей шевера и колеса, а вся обработка ведется за один двойной ход.

7.4. Расчет режимов резания при зубонарезании

7.4.1. Обработка цилиндрических колес червячной фрезой

Желательно обеспечить обработку зубчатого колеса за один проход. Однако если имеются ограничения по мощности зубообрабатывающего оборудования, жесткости технологической системы или требуется обеспечить обработку высокоточных колес, производится обработка заготовки за два прохода.

Порядок выбора элементов режима резания следующий. Вначале определяют технологическую подачу (подсчитывается по формулам или берется из таблиц справочников). Затем подсчитывают скорость резания, допускаемую режущими свойствами инструмента.

По принятой скорости резания определяют частоту вращения червячной фрезы, затем корректируют по кинематическим данным станков частоту вращения и подсчитывают действительную скорость резания.

Для проверки подсчитывают мощность, необходимую для резания, и соответствующую мощность электродвигателя станка.

Обработку зубьев производят обычно за один проход, поэтому глубина резания в этом случае равна $t = 2,25m$. Если же мощности станка недостаточно, припуск делят на два прохода с глубиной резания $t_{\text{пр}} = 1,45m$ при предварительном проходе и $t_{\text{ч}} = 0,8m$ при чистовом, где m — модуль нарезаемого колеса, мм.

Рекомендуемые величины круговых и осевых подач при нарезании зубчатых колес из различных сталей червячными фрезами приведены в справочной литературе. Круговая подача задается перемещением фрезы в миллиметрах за один оборот заготовки S_0 (преимущественно) или подачей за один оборот фрезы $S_{\text{ф}}$, которая может быть определена по формуле

$$S_{\text{ф}} = S_0 \frac{k_0}{z_1}$$

где k_0 — число заходов червячной фрезы; z_1 — число зубьев нарезаемого колеса.

Средние величины круговых подач при предварительном нарезании прямозубых колес могут быть подсчитаны по формуле

$$S_o = \frac{C_S z_1^{0,14}}{m^{0,25}},$$

где C_S — коэффициент, зависящий от обрабатываемого металла: для углеродистой стали с $\sigma_b = 700 \dots 805$ МПа $C_S = 2,65$; для хромистой и хромоникелевой стали с $\sigma_b = 750 \dots 909$ МПа $C_S = 2,0$ и для чугуна НВ 160...180 $C_S = 3,7$.

При фрезеровании колес с винтовым зубом подача может быть подсчитана по формуле

$$S_o = \frac{C_S z_1^{0,14}}{m^{0,25}} \cos \beta_1,$$

где β_1 — угол наклона зуба нарезаемого колеса.

При чистовом нарезании зубчатых колес червячной фрезой подача S_o принимается в пределах $0,3 \dots 2,0$ мм/об, в зависимости от модуля колеса.

В целях повышения производительности зубофрезерования (до 15 %) можно применять радиальное врезание. При радиальном врезании процесс резания протекает с более равномерной загрузкой станка и инструмента, что способствует меньшему износу отдельных частей станка и повышению стойкости червячной фрезы. Величина поперечной подачи S_n во время радиального врезания равна $(0,5 \dots 0,75) S_o$.

Скорость резания при нарезании зубчатых колес червячными фрезами рассчитывают по формуле

$$v = \frac{C_v}{T^n S^{y_v} m^{x_v}} K_{1v}, \dots, K_{iv},$$

где C_v , n , y_v и x_v — коэффициент и показатели степени, характеризующие условия зубообработки и свойства обрабатываемого материала; T — принятый период стойкости фрезы; m — модуль нарезаемого колеса; K_{1v}, \dots, K_{iv} — поправочные коэффициенты, учитывающие условия зубонарезания.

Значения C_v , x_v , y_v , n и поправочных коэффициентов приводятся в справочной литературе. Период стойкости червячных фрез из быстрорежущей стали принимается по нормативам от 55 до 360 мин.

Требуемую на резание мощность, кВт, рассчитывают по формуле

$$N = 10^{-3} C_N S^{y_N} m^{x_N} D^{u_N} z_1^{q_N} v K_N,$$

где C_N — коэффициент, зависящий от условий обработки; S — подача на один оборот детали, мм; m — модуль нарезаемого колеса, мм; D — наружный диаметр фрезы, мм; z_1 — число зубьев нарезаемого колеса; v — скорость резания, м/мин; K_N — поправочный коэффициент, учитывающий измененные условия работы фрезы.

Значения коэффициентов и показателей степени приведены в справочной литературе.

Основное время при нарезании зубьев червячной фрезой за один проход рассчитывается так:

$$T_0 = \frac{Lz_1}{S_{\text{окр}} n k_0},$$

где z_1 — число зубьев нарезаемого колеса; $S_{\text{окр}}$ — окружная подача детали, мм/об; n — частота вращения фрезы; k_0 — число заходов фрезы; $L = l + l_1 + l_2$ — длина рабочего хода, мм; l — длина обрабатываемой поверхности; l_1, l_2 — длины соответственно врезания и перебега, определяемые по зависимости

$$l_1 + l_2 = (1, 1 \dots 1, 2) \sqrt{h_1(D - h_1)} + (2 \dots 5).$$

Здесь $h_1 = 2,25m$ — высота зуба нарезаемого колеса; D — диаметр фрезы.

7.4.2. Обработка цилиндрических колес долбяком

В случае применения зуборезного долбяка расчет режимов резания ведут аналогично, только вместо частоты вращения червячной фрезы определяют число двойных ходов долбяка в минуту.

Глубина резания при зубодолблении принимается аналогично зубофрезерованию. При зубодолблении колес модулем 6 мм и выше для обеспечения 7-го класса точности нарезаемого колеса применяют чистовую обработку в два прохода.

Круговая подача долбяка, мм/дв.ход, зависит от требуемого качества обработанной поверхности, модуля нарезаемого колеса и его точности и принимается по справочникам.

Скорость резания при зубодолблении рассчитывают по формуле

$$v = \frac{C_v}{T^n S^{y_v} m^{x_v}} K_{1v}, \dots, K_{lv},$$

где C_v , n , y_v и x_v — коэффициент и показатели степени, характеризующие условия зубообработки и свойства обрабатываемого материала; T — принятый период стойкости долбяка; S — круговая подача долбяка, мм/дв.ход; K_{1v}, \dots, K_{lv} — поправочные коэффициенты, учитывающие условия зубонарезания.

Значения периода стойкости долбяка, величин C_v , x_v , y_v , n и поправочных коэффициентов приводятся в справочной литературе.

По принятой скорости резания можно определить число двойных ходов долбяка в минуту по формуле

$$n_{2x} = \frac{1000v}{L(1+p)},$$

где $L = b + l_1 + l_2$ — длина рабочего хода долбяка; b — ширина нарезаемого зубчатого венца; $l_1 = 3 \dots 5$ мм — величина врезания; $l_2 = 2 \dots 3$ мм — перебега долбяка; p — отношение скорости рабочего хода долбяка к скорости холостого хода (согласно паспортным данным станка).

Мощность резания для дисковых долбяков равна

$$N = 10^{-4} C_N S^{y_N} m^{x_N} z_1^{q_N} v K_N,$$

где C_N — коэффициент, зависящий от условий обработки; S — круговая подача, мм/дв.ход; m — модуль нарезаемого колеса, мм; z_1 — число зубьев нарезаемого колеса; v — скорость резания, м/мин; K_N — поправочный коэффициент, учитывающий измененные условия работы долбяка.

Основное время при зубодолблении за один проход равно

$$T_o = \frac{h_1}{S_p n_{2x}} + \frac{\pi m z_1}{S_{окр} n_{2x}},$$

где $h_1 = 2,25m$ — высота зуба нарезаемого колеса; $S_{окр}$ — окружная подача долбяка, мм/дв.ход; $S_p = (0,1 \dots 0,2) \times S_{окр}$ — врезная подача долбяка, мм/дв.ход.

8

ШЛИФОВАНИЕ

8.1. Абразивные материалы и инструменты

8.1.1. Абразивные материалы

При изготовлении кругов абразивные материалы имеют вид зерен. Они должны обладать высокой твердостью, хорошей теплоустойчивостью, а при затуплении — дробиться и образовывать новые острые лезвия. Все абразивные материалы делятся на две группы: *естественные* и *искусственные*. Естественные материалы не получили широкого применения из-за низких режущих свойств. Из искусственных абразивных материалов наиболее широко распространены электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, синтетический алмаз, кубический нитрид бора.

Электрокорунд представляет собой кристаллический оксид алюминия Al_2O_3 . Различают несколько видов электрокорунда.

Электрокорунд нормальный выпускается нескольких марок: 12А, 13А, 14А, 15А.

Электрокорунд белый марок 22А, 23А, 24А, 25А превосходит по своим режущим свойствам электрокорунд нормальный, так как в нем содержится меньше примесей.

Электрокорунд хромистый марок 32А, 33А, 34А содержит не менее 97 % Al_2O_3 и до 2 % CrO .

Электрокорунд титанистый 37А содержит не менее 97 % Al_2O_3 и не менее 2 % TiO_2 .

Электрокорунд циркониевый 38А содержит до 2 % оксида циркония.

Электрокорунд хромтитанистый марок 91А, 92А, 93А, 94А изготавливают из электрокорунда белого с присадками оксидов хрома и титана.

Монокорунд марок 43А, 44А, 45А отличается высокой прочностью и более высокими режущими свойствами и содержит 97...98 % Al_2O_3 .

Карбид кремния представляет химическое соединение кремния с углеродом (SiC) и выпускается двух видов: *черный* — марок 52С, 53С, 54С, 55С и *зеленый* — марок 62С, 63С, 64С. В черном карбиде кремния содержится 95...98 % SiC , в зеленом — 98...99 %. Он является более качественным, но и более дорогим.

Карбид бора (B_4C) обладает высокой твердостью (но в два раза меньшей твердости алмаза). Используется в несвязанном состоянии, так как имеет радиус округления режущего лезвия до 6...10 мкм (электрокорунд — до 15 мкм).

В настоящее время выпускаются *монокристаллические синтетические алмазы* следующих марок: АС2 — обычной прочности, АС4 — повышенной прочности, АС6 — высокой прочности, АС15 — кристаллический (буква С означает «синтетический»).

Выпускаются также алмазные микропорошки марок АСМ, АМ, АСН, АН.

Отрицательным свойством алмаза является то, что при обработке материалов на железной основе при температуре около 850...900 °С наблюдается активная диффузия углерода из алмаза в железо, что резко повышает изнашивание алмазного инструмента.

Зерна *кубического нитрида бора* (КНБ, или *эльбор*) при почти такой же твердости, как и у алмаза, характеризуются значительно большей теплостойкостью (до 1500...1900 °С) и отсутствием химического сродства к железу. Эльбор выпускается двух марок: ЛО — обычной механической прочности, ЛП — повышенной механической прочности.

По *размерам зерна* абразивных материалов делятся на следующие группы: шлифзерно — 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16; шлифпорошки — 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; микропорошки — М63, М50, М40, М28, М20, М14; тонкие микропорошки — М10, М7, М5.

Зернистость шлифзерна и шлифпорошка определяется размером стороны ячейки контрольного сита (в сотых долях миллиметра). Например, шлифзерно 200 при просеивании остается на сите с сеткой, у которой номинальный размер стороны ячейки на просвет равен 2000 мкм, 160 — на сите с ячейкой 1600 мкм и т.д.

Зернистость алмазных и эльборовых шлифпорошков обозначают дробью (в числителе — размер стороны ячеек верхнего сита, в знаменателе — размер стороны ячеек нижнего сита в микрометрах), например 400/250; 400/315; 160/100; 160/125.

Зернистость эльбора иногда обозначают по размеру ячеек только нижнего сита, например Л20, Л16, Л10. Зернистость микропорошков определяется размером зерен основной фракции в микрометрах (М), например М40, М28, М5.

Обозначение зернистости дополняют индексами процентного содержания основной фракции: В — 60...55 %; П — 55...45; Н — 45...40; Д — 43...39 %.

Твердость абразивного инструмента (круга) в значительной степени определяет производительность процесса обработки и качество обработанной детали. Под *твердостью кругов* понимается способность связки удерживать абразивные зерна от вырывания с поверхности круга под действием внешних сил, т.е. степень сопротивления связки вырыванию зерен круга из материала связки. Согласно ГОСТ 18118-79 круги по твердости делятся на семь классов:

М — мягкие (М1, М2, М3);

СМ — среднемягкие (СМ1, СМ2);

С — средние (С1, С2);

СТ — среднетвердые (СТ1, СТ2, СТ3);

Т — твердые (Т1, Т2);

ВТ — весьма твердые;

ЧТ — чрезвычайно твердые.

Цифровое обозначение твердости идет по степени возрастания, поэтому круг М2 тверже круга М1.

Под *структурой* шлифовального круга понимается его внутреннее строение, т.е. процентное соотношение и относительное расположение зерен, связки и пор в единице объема круга:

$$V_z + V_c + V_n = 100 \%,$$

где V_z , V_c , V_n — содержание соответственно абразивных зерен, связки, пор.

Основой системы структур является содержание абразивных зерен в единице объема инструмента:

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

С повышением номера структуры на единицу содержание абразивных зерен уменьшается на 2 %. Структуры № 1–4 называются *закрытыми* или *плотными*, № 5–8 — *средними*, № 9–12 — *открытыми*.

Связка служит для скрепления отдельных абразивных зерен в единое тело. От нее в большой степени зависит прочность удержания зерен в шлифовальном круге. Различают два вида связок: органические и неорганические.

К *органическим связкам* относятся бакелитовая (Б), вулканитовая (В), поропластовая (П), глифталевая (Г) и др. Для бакелитовой связки в качестве связующего компонента используют порошкообразный или жидкий бакелит с соответствующими наполнителями и увлажнителями. Основным компонентом вулканитовой связки является синтетический каучук. Глифталевая смола используется в качестве связки для инструментов из карбида кремния зеленого, применяемых в процессе окончательного шлифования.

К *неорганическим связкам* относятся керамическая, магнизиальная и силикатная. Наиболее распространенные керамические связки (К1, К2, К3, К5, К8, К15, К20 и др.) являются многокомпонентными смесями. Плавящиеся керамические связки (К1, К5, К8) обеспечивают прочное закрепление зерен из электрокорундовых материалов, вступая с ними в химическое взаимодействие. Спекующиеся керамические связки (К2, К3) используют для закрепления зерен карбида кремния. В процессе термической обработки они расплавляются только частично. Недостатком кругов на керамической связке является повышенная хрупкость, из-за которой их не применяют при ударной нагрузке и малой ширине круга. Однако круги на керамической связке обладают высокими прочностью, теплостойкостью и жесткостью, используются для разнообразных шлифовальных операций.

Связки для изготовления алмазных шлифовальных кругов подразделяются на три группы: керамические (К1, СК, СК1), органические (В1-01...В1-09, В2-01...В2-03 и др.) и металлические (М1-01...М1-05, М2-01...М2-05 и др.).

На перечисленных связках изготавливаются алмазные круги с 50%-й (обозначается цифрой 2), 100 (4) и реже со 150%-й и большей (6) концентрацией алмазов в алмазоносном слое. За 100%-ю концентрацию условно принимается содержание 0,88 мг алмазного порошка в 1 мм³ алмазоносного слоя. Кроме алмазов, алмазоносный слой кругов на органических связках включает наполнитель, связующее вещество и воздушные поры. Содержание этих составляющих зависит от концентрации алмазных зерен в круге. Наполнителями служат различные органические и минеральные вещества (карбид бора, железный порошок, электрокорунд белый, карбид кремния зеленый, смесь карбида с медным порошком и т.д.)

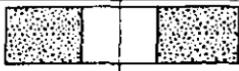
8.1.2. Виды абразивных инструментов

Шлифовальные круги. Абразивные и алмазные круги изготавливаются самых различных форм и размеров, выбор которых обусловлен конфигурацией и размерами обрабатываемой детали, требованиями к обрабатываемой поверхности, характером технологической операции, типом и размером оборудования. Типы шлифовальных кругов общего назначения регламентированы государственными стандартами. Кроме того, выпускается определенная номенклатура кругов специального назначения.

Некоторые типы абразивных кругов на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках приведены в табл. 8.1, алмазных и эльборовых — в табл. 8.2.

Таблица 8.1

Некоторые типы абразивных кругов (ГОСТ 2424-83Е)

Форма	Обозначение	Профиль
Плоский прямого профиля	1	

Окончание табл. 8.1

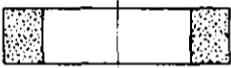
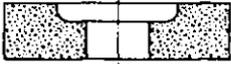
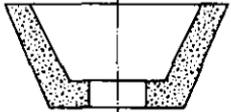
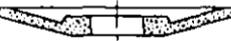
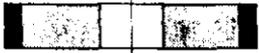
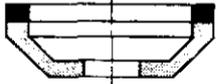
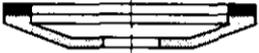
Форма	Обозначение	Профиль
Кольцевой	2	
Плоский с выточкой	5	
Чашечный конический	11	
Тарельчатый	12	

Таблица 8.2

Некоторые типы алмазных и эльборовых кругов

Форма	Обозначение	Профиль
Плоский прямого профиля	1A1	
Плоский с полукругловыпуклым профилем	1F1	
Чашечный конический	12A2-45	
Тарельчатый	12A2-20	

Маркировка шлифовальных кругов необходима для удобства их эксплуатации. Тип круга, его размеры, марка абразивного

материала, зернистость и ее индекс, номер структуры, марка связки наряду с другими параметрами составляют характеристику круга. Маркировка шлифовальных кругов с наружным диаметром 250 мм и более наносится на их торцевой поверхности; для кругов диаметром от 40 до 250 мм — на этикетках; для кругов диаметром менее 40 мм — на коробках или пакетах. Пример маркировки абразивного круга приведен на рис. 8.1, алмазного — на рис. 8.2.

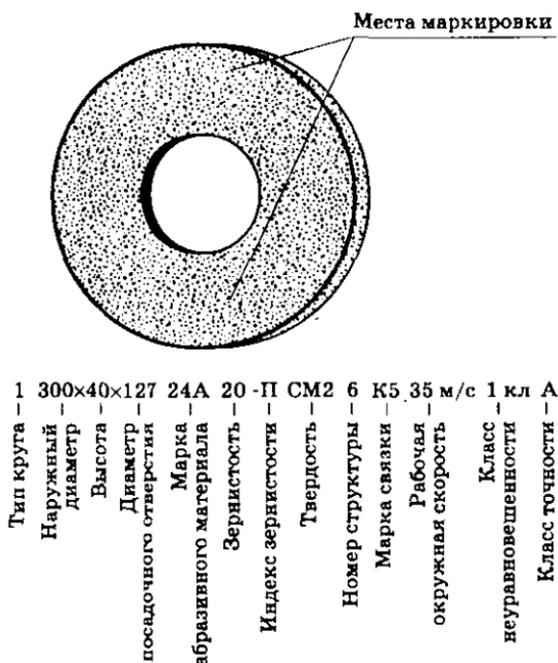


Рис. 8.1. Маркировка абразивного шлифовального круга

Шлифовальные шкурки и ленты. В промышленности используются шлифовальные и доводочные шкурки, а также ленты различного назначения.

Шлифовальная шкурка — это абразивный инструмент в виде тканевого или бумажного полотна (полосы) с нанесенным на нее с помощью специальной клейкой связки абразивным порошком. Применяется для черновой обработки деталей либо для чистово-

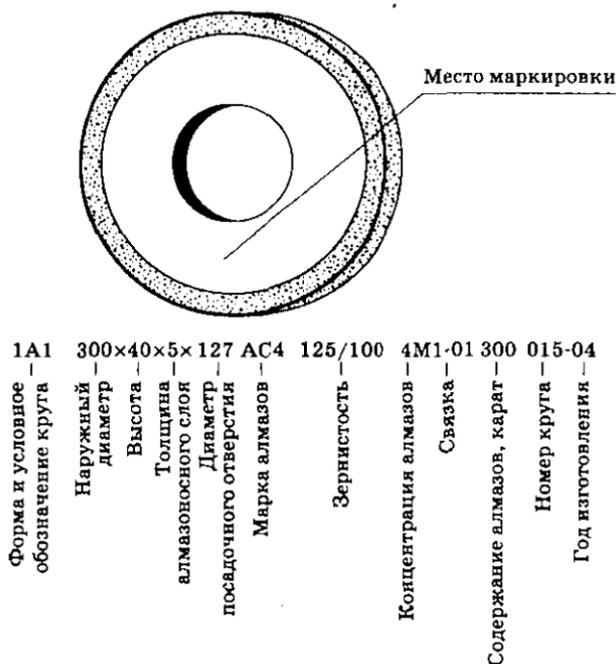


Рис. 8.2. Маркировка алмазного шлифовального круга

го шлифования или полирования. Различают следующие виды шлифовальных шкурок: *бумажная неводостойкая, тканевая неводостойкая, бумажная водостойкая, тканевая водостойкая, эльборовая и алмазная*. Из шкурок делают абразивные ленты либо лепестковые шлифовальные круги.

Шлифовальные головки. Типы абразивных шлифовальных головок приведены в табл. 8.3, алмазных — в табл. 8.4.

Таблица 8.3
 Типы абразивных шлифовальных головок (ГОСТ 2447-82Е)

Форма	Обозначение	Профиль
Цилиндрическая	AW	

Окончание табл. 8.3

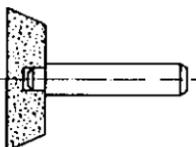
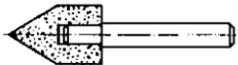
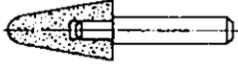
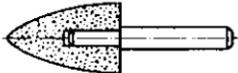
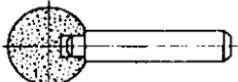
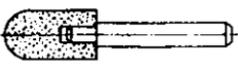
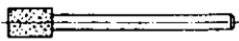
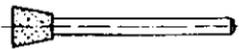
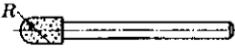
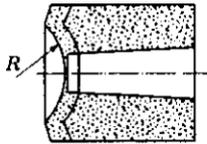
Форма	Обозначение	Профиль
Угловая	DW	
Коническая	EW	
Коническая с закругленной вершиной	KW	
Сводчатая	F-1W	
Шаровая	F-2W	
Шаровая с цилиндрической боковой поверхностью	F-2W	

Таблица 8.4

Типы алмазных шлифовальных головок (ГОСТ 17122-85)

Форма	Обозначение	Профиль
Цилиндрическая	AW	
Угловая	DW	
Коническая	EW	

Окончание табл. 8.4

Форма	Обозначение	Профиль
Усеченная коническая	D1W	
Сводчатая	F1W	
Сферическая	O	

Сегменты и бруски. Типы абразивных сегментов регламентированы ГОСТ 2464-82, абразивных брусков — ГОСТ 2456-82, алмазных брусков — ГОСТ 25594-83. Некоторые из них приведены на рис. 8.3.

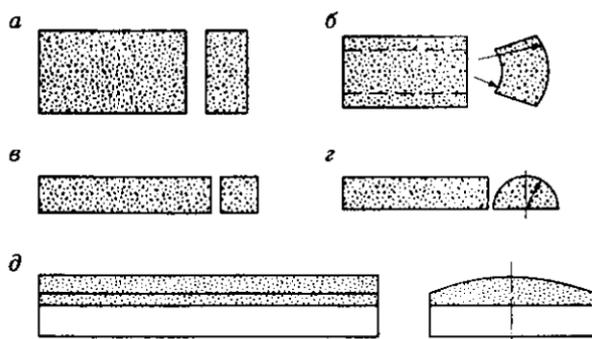


Рис. 8.3. Сегменты и бруски:

a, б — абразивные сегменты типов СП и 1С; *в, г* — абразивные бруски типов БКв и БПкр; *д* — алмазный брусок

8.2. Особенности обработки материалов шлифованием

Шлифование — процесс резания металлов, осуществляемый зернами абразивного, алмазного или эльборового материала. Шлифованием можно обрабатывать практически любые материалы, так как твердость зерен абразива и алмаза очень велика. Процесс шлифования обладает некоторыми характерными особенностями.

1. Многопроходность способствует эффективному исправлению погрешностей формы и размеров деталей, полученных после предшествующей обработки.

2. Резание осуществляется большим количеством беспорядочно расположенных абразивных зерен, обладающих высокой микротвердостью. Эти зерна, образующие прерывистый режущий контур, прорезают мельчайшие углубления, а объем металла, срезаемый в единицу времени, в этом случае значительно меньше, чем при резании металлическим инструментом.

3. Процесс срезания стружки отдельным абразивным зерном осуществляется на высоких скоростях резания (30...70 м/с) и за очень короткий промежуток времени (в течение тысячных и сотых долей секунды).

4. Абразивные зерна расположены в теле круга хаотически. Они являются многогранниками неправильной формы и имеют округленные радиусом r вершины (рис. 8.4). Округление это невелико (обычно $r = 8...20$ мкм), но его всегда надо учитывать, так как при микрорезании толщины слоев, снимаемых отдельными зернами, соизмеримы с r . С учетом этой особенности формы зерна установлены основные закономерности процесса микрорезания при работе любым абразивным инструментом. Как видно из рисунка, в процессе резания зёрна имеют отрицательные передние углы ($-\gamma$), резко повышающие их механическую прочность и сопротивление действующим на них силам. Угол резания δ обычно больше 90° . У каждого шлифующего зерна различают переднюю поверхность $ЕСВ$, по которой сходит стружка, и аднюю поверхность $ВС_1E_1$, обращенную к обработанной поверхности.

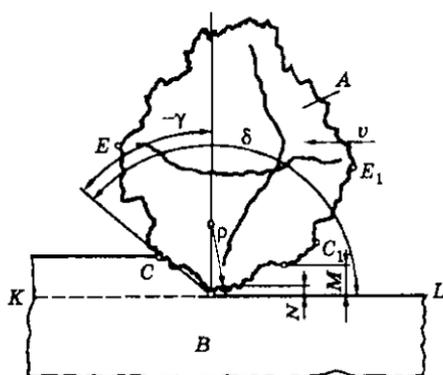


Рис. 8.4. Схема шлифующего зерна при микрорезании (*A* — основной царапающий элемент (абразивное зерно); *M* — микровыступ; *N* — субмикровыступ; *KL* — линия среза)

Поверхность абразивных и алмазных зерен всегда имеет шероховатость, вызываемую внутренним строением (несовершенством) в связи с условиями их изготовления. Наиболее значительна шероховатость синтетических алмазов. В связи с этим на зернах различают микровыступы и субмикровыступы. Они играют роль самостоятельных царапающих элементов, снимающих стружки, в 10 и 100 раз меньшие, чем основной царапающий элемент.

5. Большие скорости резания и неблагоприятная геометрия режущих зерен способствуют развитию в зоне резания высоких температур (1000...1500 °С).

6. Управлять процессом шлифования можно только за счет изменения режимов резания, так как изменение геометрии абразивного зерна, выполняющего роль резца или зуба фрезы, практически трудноосуществимо.

7. Абразивный инструмент может в процессе работы самозатупиваться. Это происходит, когда режущие грани зерен затупляются, что вызывает увеличение сил резания, а следовательно, и сил, действующих на зерно. В результате затупленные зерна выпадают (вырываются из связки) или раскалываются, и в работу вступают новые острые зерна.

8. Шлифованная поверхность образуется вследствие одновременного действия как геометрических факторов, характерных для процесса резания, так и пластических деформаций, сопровождающих этот процесс.

Процесс шлифования обычно осуществляется посредством трех движений: вращения шлифовального круга, вращения или перемещения (кругового либо возвратно-поступательного) детали и движения подачи, осуществляемого кругом или обрабатываемой деталью. Некоторые из указанных движений могут отсутствовать, например возвратно-поступательное движение детали или круга при врезном шлифовании, однако вращение шлифовального круга является неотъемлемым условием процесса шлифования.

Наиболее часто встречающимися в современном машиностроении способами шлифования являются:

1) *наружное круглое* с продольной, или осевой, подачей (рис. 8.5, а), с поперечной подачей, бесцентровое. Шлифование с поперечной подачей S_n (методом врезания, рис. 8.5, б) чаще всего применяют при обработке кругом 1 фасонных, а также коротких жестких деталей 2. Глубинное шлифование (рис. 8.5, в) применяют при обработке жестких коротких деталей со снятием припуска (до 0,4 мм) за один проход. Продольная подача S_{np} выбирается в пределах 1...6 мм за оборот детали. Чем больше диа-

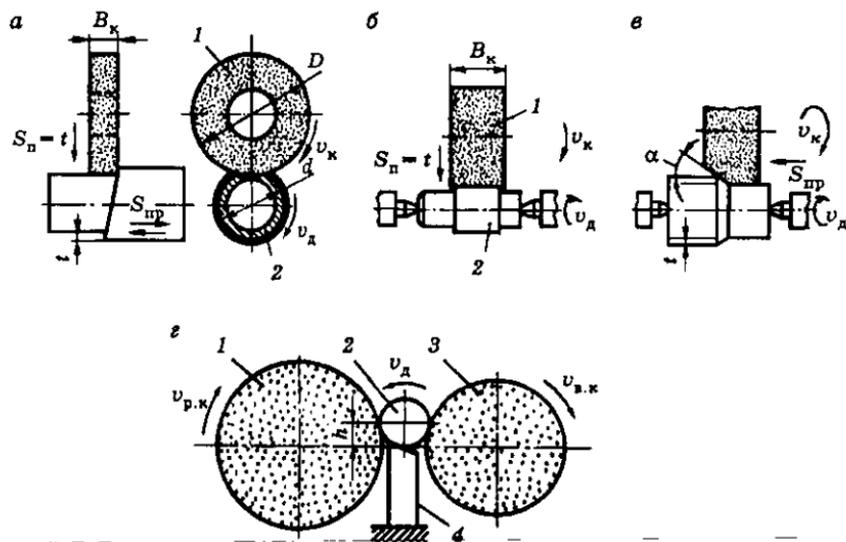


Рис. 8.5. Круглое наружное шлифование в центрах:

а — с продольной подачей; б — с поперечной подачей; в — глубинное; г — бесцентровое

метр обрабатываемой детали, тем большее значение продольной подачи принимается. Основную работу резания выполняет коническая часть круга, а цилиндрическая только зачищает обрабатываемую поверхность. При бесцентровом шлифовании (рис. 8.5, *з*) деталь 2 помещается на опорном ноже 4 между двумя вращающимися с различными скоростями кругами. Рабочий круг 1 осуществляет процесс резания, а ведущий круг 3 обеспечивает вращательное и поступательное движения детали за счет разворота его оси относительно оси рабочего круга. Ось детали устанавливается выше осей кругов на $h = (0,1 \dots 0,3)d$, где d — диаметр детали. Скорость ведущего круга раскладывается на скорость вращения детали и скорость ее продольного перемещения. В результате разных скоростей вращения кругов сила трения между ведущим кругом и деталью значительно больше окружной силы резания, что обеспечивает вращательное движение детали;

2) *внутреннее круглое* шлифование, которое может осуществляться обычным и планетарным способами. В первом случае (рис. 8.6, *а*) деталь закрепляется в патроне и получает вращательное движение; круг вращается и имеет возвратно-поступательное движение и поперечную подачу на каждый двойной ход. При планетарном способе внутреннего шлифования деталь неподвижна, а все движения осуществляются кругом (рис. 8.6, *б*). Этот метод применяется при обработке крупных и тяжелых деталей. Шлифовальный шпиндель станка имеет четыре движения: 1) вокруг своей оси со скоростью круга до 35 м/с; 2) планетарное вокруг оси обрабатываемого отверстия со скоростью 40...60 м/мин; 3) возвратно-поступательное вдоль оси изделия, измеряемое в долях ширины круга; 4) поперечная подача, осуществляемая после каждого двойного хода.

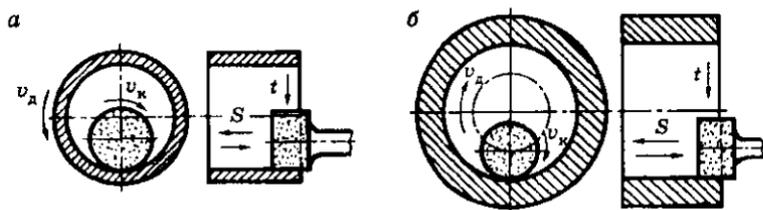


Рис. 8.6. Внутреннее шлифование:

а — с продольной и поперечной подачей; *б* — планетарное

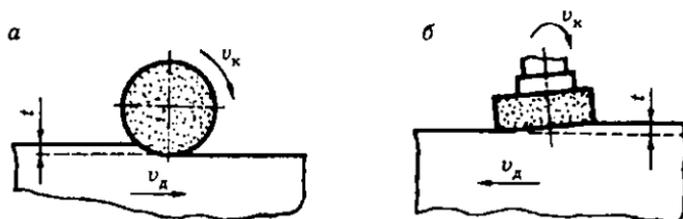


Рис. 8.7. Плоское шлифование:
 а — периферией круга; б — торцом круга

3) *плоское* шлифование, осуществляемое двумя методами: периферией круга (рис. 8.7, а) и торцом круга (рис. 8.7, б). Для этого могут использоваться круглые или прямоугольные столы. При шлифовании торцом круга поверхность контакта значительно больше, чем при шлифовании его периферией, и сопровождается большим тепловыделением в зоне резания. Следовательно, шлифование торцом круга применимо для обработки массивных жестких деталей. Для лучшего использования режущей способности круга ось шпинделя круга устанавливают под некоторым углом ($\approx 30^\circ$). Получение шлифованной поверхности сопровождается чаще всего образованием сетки, представляющей собой след от резания входной и выходной сторонами круга. Наличие сетки свидетельствует о минимальных отклонениях от плоскостности прошлифованной поверхности;

4) *специальное* (резьбовое, фасонное и т.д.).

8.3. Расчет режимов резания при шлифовании

При расчете режимов резания при шлифовании рассматривают следующие элементы. **Глубина резания**, равная **поперечной подаче** S_n , при круглом наружном и внутреннем шлифовании с продольной подачей устанавливается за двойной или один ход обрабатываемой детали либо круга. При черновом наружном

шлифовании $S_{2x} = t = 0,01 \dots 0,07$ мм/дв.ход, при чистовом $S_{2x} = t = 0,005 \dots 0,02$ мм.

Продольную подачу назначают в долях ширины круга или миллиметрах за один оборот обрабатываемой детали, а также в метрах в минуту. При черновом наружном шлифовании $S_{пр} = (0,3 \dots 0,85)B$, при чистовом $S_{пр} = (0,2 \dots 0,3)B$, где B — ширина круга, мм.

Скорость вращения круга v_k (м/с) является скоростью резания и определяется по формуле

$$v_k = \frac{\pi D_k n_k}{60 \cdot 1000},$$

где D_k — диаметр круга, мм; n_k — частота вращения круга, об/мин.

Скорость вращения обрабатываемой детали v_d (м/мин) при круглом наружном и внутреннем шлифовании

$$v_d = \frac{\pi D_d n_d}{1000},$$

где D_d — диаметр шлифуемой детали или отверстия, мм; n_d — частота вращения детали, об/мин.

Для определения режима шлифования следует:

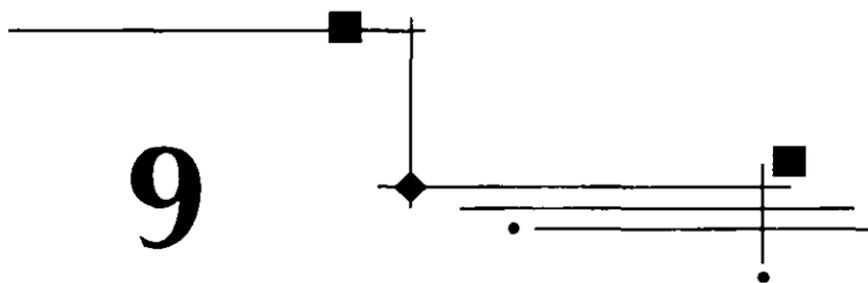
1) выбрать характеристику шлифовального круга и установить его окружную скорость v_k ; скорость шлифования обычно постоянна (20...50 м/с) и определяется паспортными данными станка;

2) назначить поперечную подачу (глубину резания t) и определить число проходов, обеспечивающих снятие всего припуска. Поддачи выбираются в соответствии с рекомендациями справочной литературы;

3) назначить продольную подачу в долях ширины круга $S_{пр} = KB$, где $K = 0,4 \dots 0,6$ для чернового шлифования; $K = 0,3 \dots 0,4$ для чистового шлифования;

4) выбрать окружную скорость вращения детали v_d . При черновом шлифовании следует исходить из установленного периода стойкости круга ($T = 25 \dots 60$ мин), при чистовом — из обеспечения заданной шероховатости поверхности. Обычно скорость вращения детали находится в пределах 40...80 м/мин.

9



ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

9.1. Прогрессивные методы обработки

9.1.1. Электроэрозионная обработка

При электроэрозионной обработке для удаления материала с поверхности детали используется электрическая энергия, т.е. такая обработка может использоваться только для материалов, проводящих электрический ток. Удаление материала происходит вследствие периодических электрических разрядов или в импульсной электрической дуге, образующейся между деталью и электродом-инструментом, в диэлектрической рабочей жидкости (рис. 9.1).

Процесс электроэрозионной обработки осуществляется в следующей последовательности. При приближении электрода-инструмента к детали между ними возникает разность потенциалов. При достижении ее граничного значения между катодом и наиболее выступающим фрагментом поверхности детали возникает разряд (пробой слоя диэлектрической жидкости), и в ре-

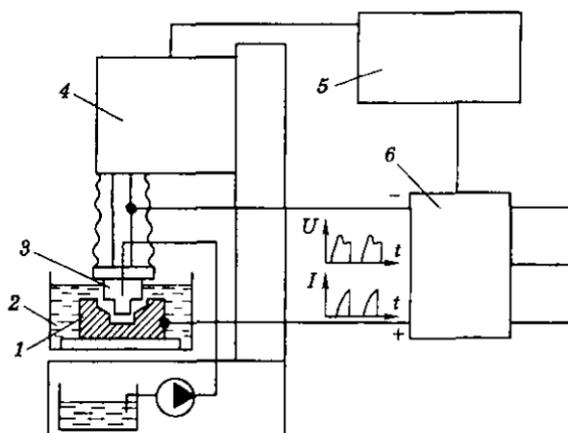


Рис. 9.1. Схема объемной электроэрозионной обработки:

- 1 — обрабатываемая деталь (анод); 2 — диэлектрическая жидкость;
3 — электрод-инструмент (катод); 4 — привод подачи; 5 — система управления; 6 — генератор электрических импульсов

в результате начинается эмиссия электронов с катода (рис. 9.2, а). В сильном электрическом поле электроны приобретают значительное ускорение, соударяются с атомами жидкости и вызывают ее ионизацию. В результате возникает плазменный канал, заполненный ионами и электронами (рис. 9.2, б). Ионы с высокой скоростью ударяют в поверхность анода (детали), и механическая энергия удара преобразуется в тепловую энергию. Температура в плазменном канале резко возрастает (может достигать 14 000 К), а вокруг канала формируется газовая полость возрастающего диаметра.

В результате локального возрастания температуры имеет место плавление и частичное испарение некоторого объема материала детали (вокруг места разряда). По окончании электрического разряда давление внутри газового пузыря падает, ускоряя испарение расплавленного материала; иногда наблюдаются микровзрывы. Частицы расплава выбрасываются в диэлектрическую жидкость, застывая в виде микрокапель (рис. 9.2, в). Металл, оставшийся в кратере, застывает. Далее такой же единичный процесс возникает в другом месте на поверхности детали, где зазор между анодом и катодом будет наименьший. В результате

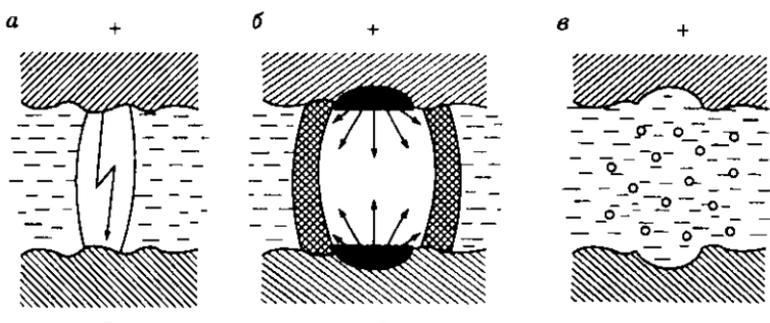


Рис. 9.2. Схема процесса электроэрозионной обработки

обработанная поверхность покрывается микроскопическими сферическими углублениями (рис. 9.3).

В ходе перемещения электрода-инструмента в глубь детали происходит копирование профиля инструмента (рис. 9.4). В промышленности также широко используется вырезка сложных профилей проволочными электродами малого диаметра (рис. 9.5) на станках с ЧПУ, что, благодаря согласованности перемещений, позволяет формировать пространственные поверхности реза.

В качестве диэлектрических жидкостей используется дистиллированная вода, эмульсии, нефть, керосин, трансформаторное масло и др. Материал катода — медь, латунь, графит, композиционные псевдосплавы типа «медь-графит» или «медь-вольфрам».

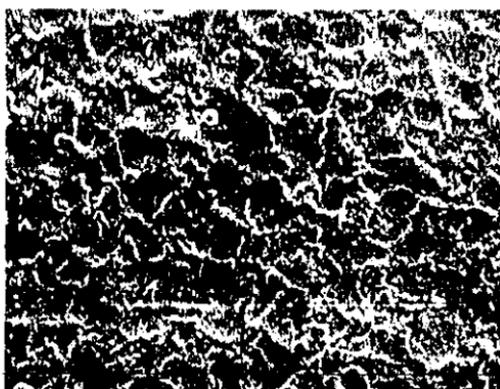


Рис. 9.3. Поверхность после электроэрозионной обработки (материал нимоник, $\times 100$)

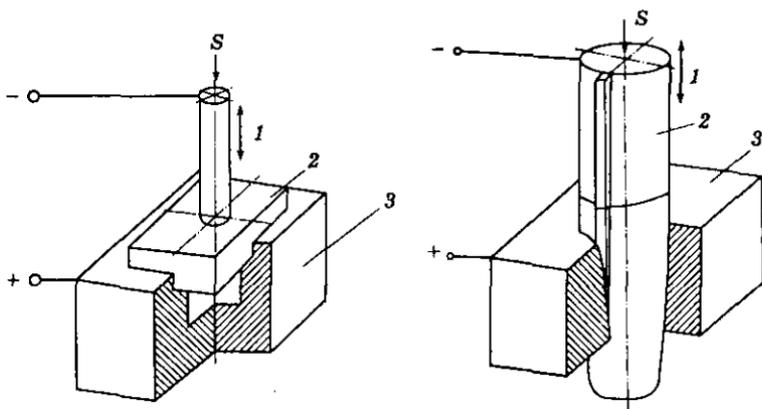


Рис. 9.4. Схемы объемной электроэрозионной обработки:
1 — импульсные перемещения катода; 2 — инструмент; 3 — деталь

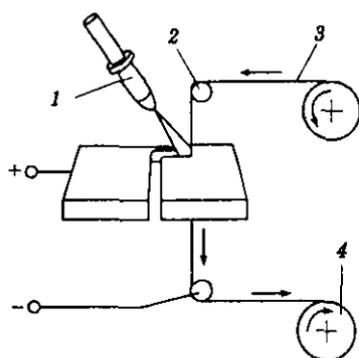


Рис. 9.5. Схема электроэрозионной вырезки:
1 — сопло подачи диэлектрической жидкости; 2 — направляющий ролик;
3 — проволочный катод; 4 — катушка для намотки проволоки

9.1.2. Электрохимическая обработка

Процесс электрохимической обработки основан на анодном растворении слоев металла в электролите. Рабочей зоной станка для электрохимической обработки является ванна с металлическим катодом, соединенным с отрицательным полюсом источника постоянного тока (рис. 9.6). Анодом (положительным полюсом) является обрабатываемая деталь. Анодное растворение происходит в электропроводящей жидкости (электролите) в ходе протекания электрохимических реакций. При этом ионы металла переходят в электролит, а продукты электрохимических реакций оседают на электродах и в электролите и далее — на дне ванны. Напряжение между электродами 5...25 В. Стабилизация процесса обеспечивается увеличением скорости перемещения электролита в ванне (перемешиванием) и путем удаления осадка.

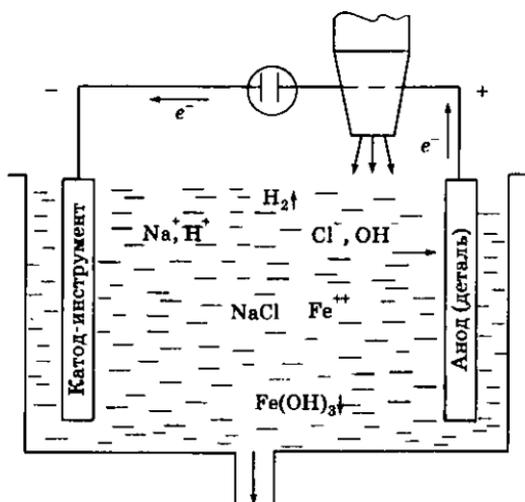


Рис. 9.6. Схема процесса электрохимического растворения металла

В качестве электролитов используются водные растворы NaCl , KCl , NaNO_3 , KNO_3 , которые подаются в межэлектродную щель под избыточным давлением 0,3...3 МПа и со скоростью до 10 м/с. Материалы катодов — медь, латунь, бронза, нержавеющая сталь.

Пример формообразующей электрохимической обработки приведен на рис. 9.7.

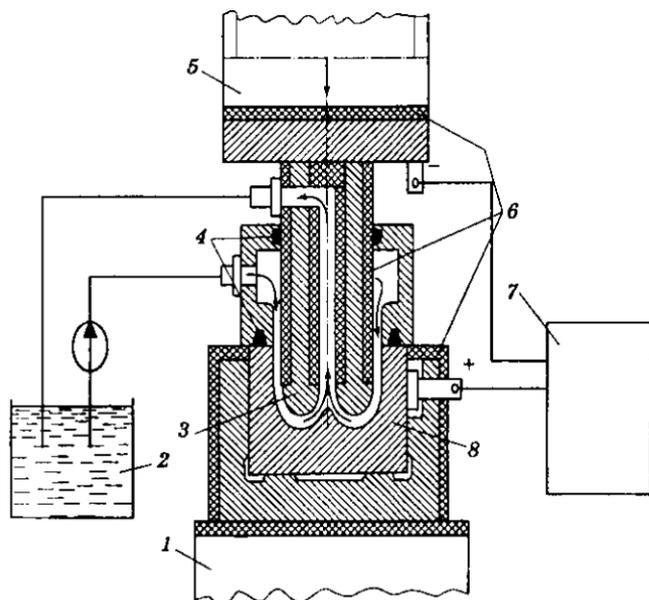


Рис. 9.7. Схема электрохимической обработки:

1 — стол станка; 2 — бак с электролитом; 3 — катод-инструмент; 4 — уплотнения; 5 — инструментальная головка; 6 — изоляция; 7 — генератор постоянного тока; 8 — деталь

9.1.3. Лазерная обработка

Лазерная обработка основана на использовании энергии светового излучения, поглощаемой обрабатываемым материалом и преобразуемой в тепловую энергию.

В зависимости от времени экспозиции и удельной мощности излучения возможны следующие уровни и результаты лазерной обработки:

1) нагревание до температур ниже линии A_{c1} (согласно диаграмме железо-углерод) при удельной мощности $10^1 \dots 10^2$ Вт/см². Такая обработка используется для подогрева обрабатываемого материала при сварке или лезвийной обработке;

2) нагревание до температур ниже температуры плавления при удельной мощности $10^2 \dots 10^6$ Вт/см². При этом имеют место фазовые превращения в обрабатываемом материале, т.е. возможны различные виды поверхностной термообработки.

3) нагревание до температур выше температуры плавления при удельной мощности $10^4 \dots 10^7$ Вт/см². Такой вид нагрева используется для поверхностного легирования, наплавки, формирования аморфной структуры поверхностного слоя, закрытия поверхностных пор и т.п.;

4) нагревание до температур выше температуры испарения при удельной мощности $10^6 \dots 10^{10}$ Вт/см². В этом случае возможны резка, микросварка, формирование микроскопических отверстий* (рис. 9.8) и детонационная обработка;

5) нагревание до температур выше температуры испарения при удельной мощности свыше 10^{20} Вт/см². В таких условиях имеет место сублимация (холодное испарение) обрабатываемого материала. Процесс используется в нанотехнологиях.

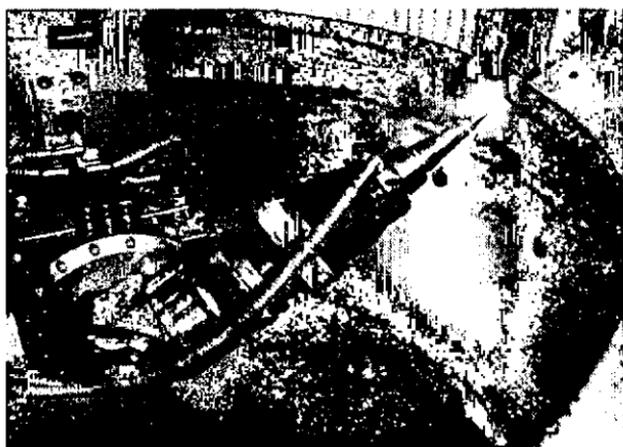


Рис. 9.8. Лазерная обработка микроотверстий на многоцелевом станке

* Такая обработка используется при формировании системы отверстий диаметром 0,005 мм и в 50 раз большей глубиной в лопатках турбин двигателей самолетов «Боинг-747», служащих для их охлаждения подаваемым под давлением сжатым воздухом.

9.2. Режущие инструменты для гибких автоматизированных производств

Элементы инструментальной оснастки. Оборудование с ЧПУ, используемое в гибких производственных системах (ГПС), характеризуется весьма высокими скоростями резания, быстрой заменой режущих инструментов в ходе обработки, возможностью обработки различных деталей на одном и том же рабочем месте и рядом других характерных особенностей. Это требует принципиальных изменений в конструкциях используемых режущих инструментов.

В настоящее время разработаны системы инструментальной оснастки для станков с ЧПУ, представляющие собой наборы унифицированного вспомогательного (резцедержателей, оправок, втулок, зажимных патронов и т.п.) и специального режущего инструмента. Такие системы предназначены для компоновки инструментальных блоков (комбинаций режущего и вспомогательного инструмента), каждый из которых служит для выполнения конкретного технологического перехода. Поэтому важно наименьшим количеством вспомогательных инструментов крепить наибольшее количество режущих инструментов.

В настоящее время получили распространение несколько способов присоединения инструментального блока к шпинделю станка или револьверной головке.

В станках *сверльно-фрезерно-расточной группы* наиболее широко используется соединение конических поверхностей с конусностью 7:24 (рис. 9.9). Такой конус не является самотормозящимся и позволяет легко извлечь оправку из шпинделя. Крутящий момент со шпинделя передается с помощью торцовых шпонок. В шпинделе оправка удерживается с помощью тяги и тарельчатых пружин или затягивается винтом. Движение тяги или винту передается от гидроцилиндра или электродвигателя.

Как отмечалось выше, вспомогательные инструменты служат для соединения режущих инструментов со шпинделем станка, суппортом или револьверной головкой. В настоящее время раз-

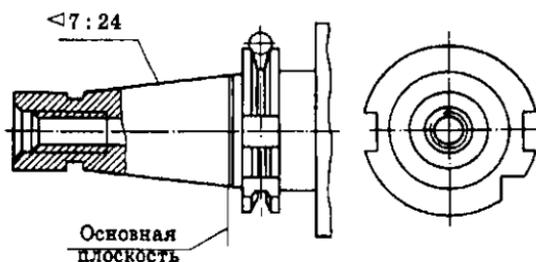


Рис. 9.9. Хвостовик шпиндельных оправок станков сверлильно-фрезерно-расточной группы

работаны системы для сверлильно-фрезерно-расточных станков с коническим посадочным отверстием шпинделя.

Такая система состоит из ряда шпиндельных оправок, переходных оправок и патронов. Некоторые элементы приведены на рис. 9.10. Оправки 1–3 служат для крепления фрез с торцовыми или продольными шпонками или фрез, центрируемых по отверстию. Цанговые патроны 4 используются для закрепления сверл, разверток, фрез с цилиндрическим хвостовиком. В комплект входят переходные оправки для закрепления концевых фрез с хвостовиком специальной формы (5), инструментов с конусом Морзе и лапкой (6) или резьбовым отверстием (7), державки для регулируемых втулок и оправок (8). Оправки 9, 10 используются для закрепления расточных резцов, оправки 11 — для насадных разверток, оправки 12 — для подрезных пластин. В подсистему входят также универсальные расточные головки (13).

Применение переходных оправок, закрепляемых в державке 8, позволяет регулировать осевые размеры инструментов вне станка. В державках закрепляются цанговые патроны 14, переходные регулируемые втулки 15, оправки для насадных зенкеров и разверток 16, патроны для метчиков 17, расточные оправки 18, оправки для двухрезцовых головок 19 и дисковых фрез 21, державки для перовых сверл 20.

Из вспомогательных инструментов с конусом Морзе в подсистему входят сверлильные патроны 22, патроны для метчиков 23, расточные патроны 24 и оправки для насадных разверток 25.

В станках *токарной группы* широко используется присоединение инструмента к револьверной головке или резцедержателю

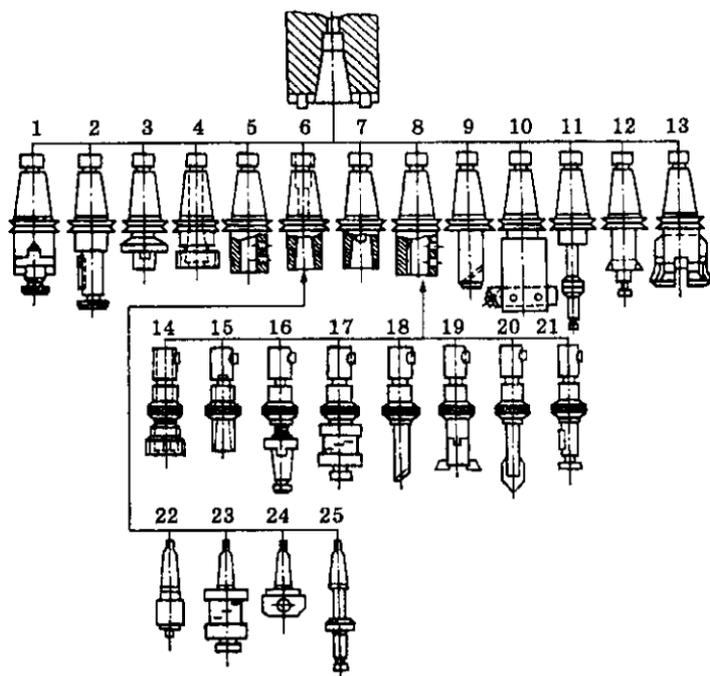


Рис. 9.10. Подсистема вспомогательных инструментов для станков сверлильно-фрезерно-расточной группы

с помощью цилиндрического хвостовика. Пример конструкции такой державки приведен на рис. 9.11.

Базирование резцедержателя производится по цилиндрической поверхности, обеспечивающей точную угловую установку инструмента. Крепление хвостовика в revolverной головке осуществляется при помощи сухаря или клина, имеющего рифления, смещенные относительно рифлений хвостовика. В результате опорная поверхность резцедержателя прижимается к revolverной головке с усилием в несколько десятков килоньютон.

Для установки реза на высоте центров служит опорная планка 4. Резец крепят с помощью винтов 2 и прижимной планки 3. Подача СОЖ в зону резания осуществляется через канал в корпусе 6, образованный пересекающимися отверстиями и заканчивающийся шариком 1, позволяющим регулировать направление

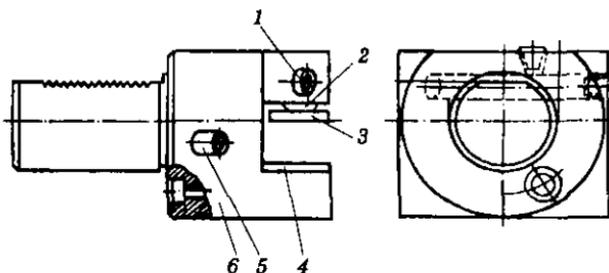


Рис. 9.11. Резцедержатель с цилиндрическим хвостовиком к станкам токарной группы:

- 1 — шарик подвода СОЖ; 2 — винт крепления прижимной планки;
3 — прижимная планка; 4 — опорная планка; 5 — регулировочный винт;
6 — корпус

подачи СОЖ. Для облегчения настройки резца на размер в корпусе установлены под углом 45° друг к другу два регулировочных винта 5.

Вспомогательные инструменты для токарных станков с ЧПУ объединены в подсистему, состоящую из державок с цилиндрическим хвостовиком (рис. 9.12).

Для обработки корпусных, плоских деталей и деталей типа среднего и мелкого литья в ГПС на базе многоцелевых станков при большом разнообразии деталей и уменьшении их количества в партии требуется значительное увеличение числа инструментов. Для сокращения числа инструментов применяют *блочно-модульные системы инструментов*. Такие инструменты выполняют составными из отдельных элементов (модулей): базовых хвостовиков, переходников и элементов для базирования и закрепления режущего инструмента (держателей инструмента), из которых komponуют необходимые конструкции инструмента (рис. 9.13). Модульные инструменты могут быть использованы многократно для различных операций путем замены одного или нескольких модулей.

Быстросменные конструкции режущих инструментов. Быстрота смены инструмента обеспечивается совершенствованием методов его крепления и базирования, а также унификацией присоединительных поверхностей режущего и вспомогательного инструментов.

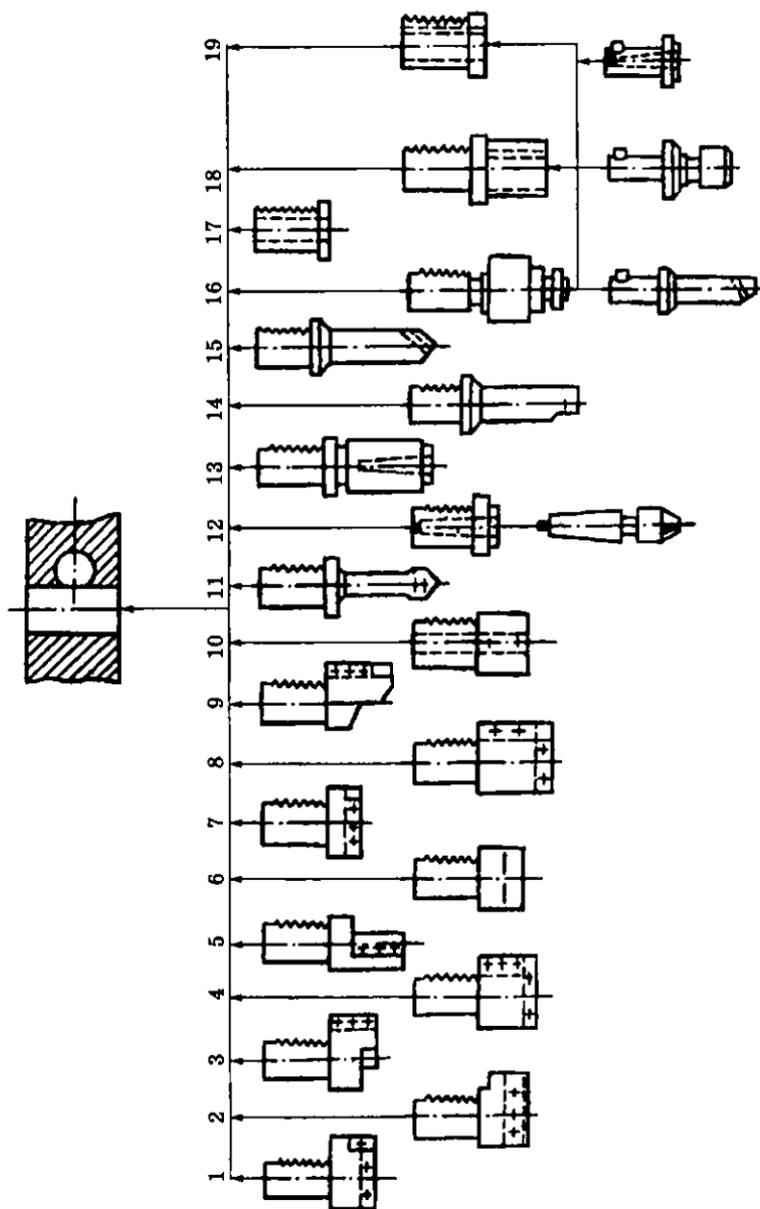


Рис. 9.12. Подсистема вспомогательных инструментов для станков токарной группы

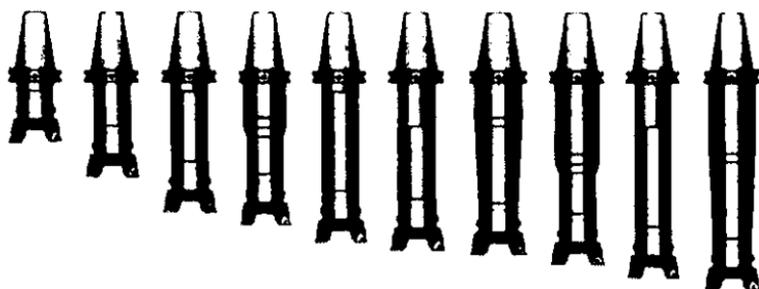


Рис. 9.13. Комплект оправок модульной конструкции

Базирование инструмента должно быть таким, чтобы силы резания воспринимались базовыми поверхностями вспомогательного инструмента (державки), а элементы креплений инструмента были от них разгружены. Эти элементы предназначены только для прижима базовых поверхностей режущего инструмента к базовым поверхностям вспомогательного инструмента.

Идентичность базирования инструмента в настроечном приспособлении и в державке повышает точность установки. В частности, широкое распространение получило крепление резцов и вставок клиновидным сухарем, который затягивается винтом (рис. 9.14). На боковой поверхности резца имеется скос (от 10 до 45°) для более надежного базирования в револьверной головке или державке.



Рис. 9.14. Резцовая вставка со скосом (а) и схема ее крепления (б)

Бесподналадочная замена инструмента обеспечивается наличием элементов регулирования его размера по длине или размера вылета. Элементы регулирования компенсируют также изменение размеров инструмента после переточки.

На резцах требуемую длину получают применением регулировочных винтов со сферической головкой, которая должна касаться упора резцедержателя (рис. 9.15, а).

Бесподналадочная замена осевого инструмента достигается применением регулировочных винтов, обеспечивающих получение требуемой длины инструмента (рис. 9.15, б, в) или регулировочных гаек (рис. 9.16), позволяющих получить необходимый вылет инструмента.

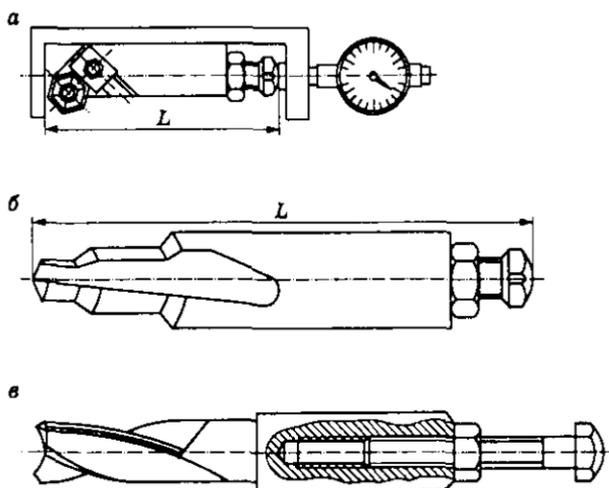


Рис. 9.15. Бесподналадочные инструменты с регулировочными винтами: а — резец; б — центровочное сверло; в — концевая фреза

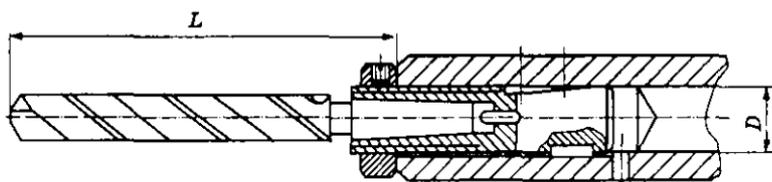


Рис. 9.16. Схема настройки вылета стержневого инструмента регулировочной гайкой

9.3. Повышение износостойкости режущих инструментов

Развитие технологии производства инструментов из быстрорежущих сталей и оснащенных сменными пластинами из твердого сплава связано с нанесением на них твердых и износостойких пленок толщиной в несколько микрометров, обычно называемых *покрытиями*.

В зависимости от обрабатываемого материала и условий обработки могут быть использованы следующие разновидности покрытий:

- базирующиеся на использовании слоев TiN, TiC и Ti(N,C), иногда с добавлением Al и Cr, например (Ti,Al)N;
- керамические, в том числе Al_2O_3 ;
- сверхтвердые, например алмазные;
- имеющие очень низкий коэффициент трения, в том числе дисульфит молибдена, графит и аморфные соединения типа Me-C:H.

В промышленности используются следующие разновидности покрытий, созданные путем комбинаций различных одиночных слоев:

- однослойные толщиной 0,5...50 мкм;
- традиционные многослойные со слоями различного функционального назначения и толщиной отдельных слоев 0,5...10 мкм;
- многослойные с так называемой наноструктурой и толщиной отдельных слоев от нескольких до 100 нм;
- градиентные с градиентом свойств (твердости) и химического состава;
- сверхтвердые на базе поликристаллических искусственных алмазов или композитов на основе нитрида бора;
- твердые смазки типа MoS_2 , графита и т.д.;
- двухслойные типа твердая смазка Me-C:H + слой твердого материала.

Примеры использования таких покрытий приведены в табл. 9.1.

Инструменты с покрытиями отличаются лучшими режущими свойствами, обеспечивая повышение периода стойкости в 3–5 раз или скорости резания на 10...30 % при неизменной стойкости по сравнению с инструментами без покрытия.

Таблица 9.1

Разновидности и назначения покрытий фирмы «Kennametal—Hertel»

Структура	Назначение	Структура	Назначение
 <p>TiN Твердый сплав</p>	Обработка жаропрочных сплавов с малыми и средними скоростями резания	 <p>TiN Al_2O_3 TiCN Твердый сплав</p>	Обработка стали и серого чугуна, в том числе с высокими скоростями резания
 <p>TiN TiCN TiC Твердый сплав</p>	Обработка стали с малыми и средними скоростями резания	 <p>Алмаз Твердый сплав</p>	Обработка цветных сплавов и пластмасс
 <p>TiCN TiC TiCN Al_2O_3 TiN Твердый сплав</p>	Обработка нержавеющей стали и чугунов со средними скоростями резания	 <p>TiN TiCN TiN Твердый сплав</p>	Обработка жаропрочных и титановых сплавов; обработка с высокими скоростями

Рекомендуемая литература

Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент / В.А. Аршинов, Г.А. Алексеев. М.: Машиностроение, 1976.

Башков В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П. Г. Кацев. М.: Машиностроение, 1985.

Боровский Г.В. Справочник инструментальщика / Г.В. Боровский [и др.]. М.: Машиностроение, 2005.

Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975.

Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. М.: Машиностроение, 1986.

Грановский Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. М.: Машгиз, 1948.

Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. М.: Машиностроение, 1985.

Жигалко Н.И. Протяжки для обработки отверстий большой длины / Н.И. Жигалко. Минск: Вышэйш. шк., 1973.

Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов / Г.Г. Иноземцев. М.: Машиностроение, 1984.

Инструментальные системы автоматизированного производства / Р.И. Гжиров [и др.]. СПб.: Политехник, 1993.

Кацев П.Г. Обработка протягиванием / П.Г. Кацев. М.: Машиностроение, 1986.

Кузнецов Ю.И. Оснастка станков с ЧПУ : справочник / Ю.И. Кузнецов [и др.]. М.: Машиностроение, 1990.

Лакирев С.Г. Обработки отверстий : справочник / С.Г. Лакирев. М.: Машиностроение, 1986.

Ларин М.Н. Высокопроизводительные конструкции фрез и их рациональная эксплуатация / М.Н. Ларин. М.: Машгиз, 1957.

Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств / А.Р. Маслов. М.: Машиностроение, 2006.

Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент : справочник / В.С. Самойлов [и др.]. М.: Машиностроение, 1988.

Металлорежущие инструменты / Г.Н. Сахаров [и др.]. М.: Машиностроение, 1989.

Обработка металлов резанием. Справочник технолога / под ред. А.А. Панова / М.: Машиностроение, 2004.

Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справочник / под общ. ред. А.Д. Локтева. В 2 т. М.: Машиностроение, 1991.

Общемашиностроительные нормативы режимов резания для многоцелевых станков фрезерно-сверлильно-расточной группы. М.: ВНИИТЭМР, 1986.

Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.

Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов / В.И. Баранчиков [и др.]. М.: Машиностроение, 1990.

Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис [и др.]. М.: Машиностроение, 1986.

Развитие науки о резании металлов / под ред. Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967.

Режущий инструмент / В.А. Гречишников [и др.]. М.: Машиностроение, 2007.

Режущий инструмент и инструментальное обеспечение автоматизированного производства / Е.Э. Фельдштейн [и др.]. Минск: Вышэйш. шк., 1993.

Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование / под ред. Е.Э. Фельдштейна. Минск: ДизайнПРО, 2002.

Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами и их применение : справочник / В.П. Жедь [и др.]. М.: Машиностроение, 1987.

Рекомендации по рациональной эксплуатации режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ. М.: ВНИИТЭМР, 1986.

Родин П.Р. Металлорежущие инструменты / П.Р. Родин. Киев: Вища шк., 1974.

Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов / под общ. ред. Г.Н. Кирсанова. М.: Машиностроение, 1986.

Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хае [и др.]; под общ. ред. Г.Л. Хаета. М.: Машиностроение, 1989.

Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко [и др.]. М.: Машгиз, 1962.

Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев [и др.]. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987.

Справочник конструктора-инструментальщика / под общ. ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1994.

Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. В 2 т. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2.

Справочник технолога по автоматическим линиям / А.Г. Косилова [и др.]. М.: Машиностроение, 1982.

Солоненко В.Г. Резание металлов и режущие инструменты / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. М.: Высш. шк., 2007.

Фельдштейн Е.Э. Режущий инструмент и оснастка станков с ЧПУ : справ. пособие / Е.Э. Фельдштейн. Минск: Вышэйш. шк., 1988.

Фельдштейн Е.Э. Обработка отверстий : справочник сверловщика / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. Минск: ДизайнПРО, 2000.

Фельдштейн Е.Э. Режущий инструмент / Е.Э. Фельдштейн [и др.]. Минск: Новое знание, 2007.

Филиппов Г.В. Режущий инструмент / Г.В. Филиппов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981.

Фрайфельд И.А. Расчеты и конструкции специального металлорежущего инструмента / И.А. Фрайфельд. М.; Л.: Машгиз, 1957.

Хает Г.Л. Прочность режущего инструмента / Г.Л. Хает. М.: Машиностроение, 1975.

Шлифование металлов / под ред. Л.М. Кожуро. Минск: ДизайнПРО, 2000.

Щеголев В.А. Конструирование протяжек / В.А. Щеголев. М.: Машгиз, 1960.

Эльбор в машиностроении / под ред. В.С. Лысанова. Л.: Машиностроение, 1978.

Юликов М.И. Проектирование и производство режущего инструмента / М.И. Юликов [и др.]. М.: Машиностроение, 1987.

Ящерицын П.И. Теория резания : учебник / П.И. Ящерицын [и др.]. Минск: Новое знание, 2007.

ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.

Оглавление

Предисловие	3
1. Общие сведения о механической обработке материалов резанием	5
1.1. Сущность и виды обработки материалов резанием	5
1.2. Главные и вспомогательные движения при обработке резанием. Поверхности обработки	8
1.3. Современные инструментальные материалы	12
2. Обработка материалов точением	25
2.1. Геометрия токарного резца	25
2.2. Элементы режима резания и срезаемого слоя	33
2.3. Физические явления при токарной обработке	35
2.4. Сопротивление резанию при токарной обработке	45
2.5. Тепловые явления при токарной обработке	55
2.6. Износ и стойкость резцов	61
2.7. Скорость резания, допускаемая режущими свойствами резца	68
2.8. Смазочно-охлаждающие технологические среды	70
2.9. Конструкции и расчеты токарных резцов	79
2.10. Конструкции и расчет фасонных резцов	91
2.11. Конструкции расточных инструментов	99
2.12. Расчет режимов резания при точении	101
3. Обработка отверстий осевыми инструментами	107
3.1. Сверление	107
3.2. Зенкерование	122
3.3. Развертывание	127
3.4. Конструкции и расчет сверл, зенкеров и разверток	132
3.5. Расчет режимов резания при сверлении, зенкеровании и развертывании	153

4. Фрезерование	156
4.1. Обработка материалов цилиндрическими фрезами	156
4.2. Обработка материалов торцовыми фрезами	169
4.3. Современные конструкции фрез	174
4.4. Расчет и конструирование фрез	183
4.5. Расчет режимов резания при фрезеровании	196
5. Протягивание	199
5.1. Процесс протягивания	199
5.2. Разновидности протяжек	208
5.3. Расчет и конструирование протяжки	216
5.4. Расчет режимов резания при протягивании	232
6. Резьбонарезание	234
6.1. Нарезание резьбы резцами, гребенками и резьбонарезными головками	234
6.2. Нарезание резьбы плашками	238
6.3. Нарезание резьбы метчиками	240
6.4. Нарезание резьбы дисковыми и гребенчатыми фрезами	243
6.5. Накатывание и раскатывание резьбы	246
6.6. Конструкции и расчет резьбонарезных инструментов	249
6.7. Расчет режимов резания при нарезании резьбы	254
7. Зубонарезание	258
7.1. Нарезание зубчатых колес по методу копирования ...	258
7.2. Нарезание зубчатых колес по методу обкатки	262
7.3. Расчет и конструирование зуборезных инструментов ...	266
7.4. Расчет режимов резания при зубонарезании	275

8. Шлифование	279
8.1. Абразивные материалы и инструменты	279
8.2. Особенности обработки материалов шлифованием ...	289
8.3. Расчет режимов резания при шлифовании	293
9. Прогрессивные методы обработки материалов и режущие инструменты	295
9.1. Прогрессивные методы обработки	295
9.2. Режущие инструменты для гибких автоматизированных производств	302
9.3. Повышение износостойкости режущих инструментов ...	309
Рекомендуемая литература	311

Учебное издание

Профессиональное образование

**Фельдштейн Евгений Эммануилович
Корниевич Михаил Анисимович
Михайлов Михаил Иванович**

Обработка материалов и инструмент

Учебное пособие

Редактор	<i>С.В. Исаенко</i>
Художник обложки	<i>С.В. Ковалевский</i>
Компьютерная верстка	<i>Е.Н. Тихонович</i>
Корректор	<i>К.А. Степанова</i>

Подписано в печать с готовых диапозитивов 26.09.2008.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага газетная. Гарнитура Школьная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,67. Уч.-изд. л. 13,96.
Тираж 2010 экз. Заказ № 3226.

Общество с ограниченной ответственностью «Новое знание».
ЛИ № 02330/0133439 от 30.04.2004. Минск, пр. Пушкина, д. 15, ком. 16.
Почтовый адрес: 220050, Минск, а/я 79.
Телефон/факс: (10-375-17) 211-50-38. E-mail: nk@wnk.biz

В Москве:
Москва, Колодезный пер., д. 2а.
Телефон: (495) 234-58-53. E-mail: ru@wnk.biz

<http://wnk.biz>

Открытое акционерное общество
«Барановичская укрупненная типография».
225409, г. Барановичи, ул. Советская, 80.
ЛП № 02330/0131659 от 02.02.2006 г.



Для ССУЗов и ПТУ

- **Деловой английский язык**
А.М. Федоров
Учебное пособие, 560 с.
- **Математика.**
Задачи с экономическим содержанием
С.А. Гуринович
Учебное пособие, 264 с.
- **Общий курс слесарного дела**
В.Р. Карпицкий
Учебное пособие, 400 с.
- **Системы автоматизированного управления электроприводами**
Под общ. ред. Ю.Н. Петренко
Учебное пособие, 394 с.
- **Теория автомобилей и двигателей**
В.П. Тарасик, М.П. Бренч
Учебное пособие, 400 с.

Серия "Профессиональное образование"

- **Автомобильные эксплуатационные материалы**
И.А. Трофименко, Н.А. Коваленко, В.П. Лобах
Учебное пособие, 232 с.
- **Кормопроизводство**
В.А. Сельманович
Учебное пособие, 256 с.
- **Материаловедение и технология конструкционных материалов**
Н.В. Акулич
Учебное пособие, 272 с.
- **Обработка материалов и инструмент**
Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич, М.И. Михайлов
Учебное пособие, 240 с.
- **Столярные, паркетные и стекольные работы.**
Материаловедение
Г.Т. Широкий, А.А. Шило, П.И. Юхневский
Учебное пособие, 232 с.
- **Техническая эксплуатация автомобилей**
Н.А. Коваленко, В.П. Лобах, Н.В. Вепринцев
Учебное пособие, 352 с.
- **Техническое нормирование**
О.Я. Седель
Пособие, 202 с.

Наши координаты:

в Москве: (495) 234-58-53, e-mail: ru@wnk.biz

в Минске: (+375-17) 211-50-38, e-mail: nk@wnk.biz

ОТКРЫТАЯ КНИГА



«Открытая книга» предлагает широкий спектр литературы
(около 50.000 наименований)

в наличии и под заказ по следующим тематикам:

Экономика. Бизнес
Техника
Сельское хозяйство
Промышленность
Компьютерная литература
Общественные науки
Юриспруденция
Естественные науки
Медицина
Филология. Искусство
Иностранные языки и словари
Хобби. Досуг. Спорт

Разыскиваем нужные книги по интересующим Вас тематикам.
Предлагаем плодотворное и взаимовыгодное сотрудничество!
Ждем Ваших звонков и писем!

Адрес:	220015, г. Минск, пр-т Пушкина, 15а-15
Телефон/факс:	+375 (17) 256-18-85, 211-50-38
Телефон:	+375 (29) 3-640-640, 7-640-640
Почтовый адрес:	220015, РБ, г. Минск, а/я 76
E-mail:	sale@wnk.biz

ИЗДАТЕЛЬСТВО



“НОВОЕ ЗНАНИЕ”

Для заметок

Наши координаты:

в Москве: (495) 234-58-53, e-mail: ru@wnk.biz
в Минске: (+375-17) 211-50-38, e-mail: nk@wnk.biz

<http://wnk.biz>