

РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

ВВЕДЕНИЕ.

В курсе «Резание металлов и режущий инструмент» изучаются основы Теории резания, виды обработки металлов резанием, геометрия инструмента и ее влияние на обработку металлов, а также режущий инструмент: виды и способы применения.

В результате изучения данного курса студент будет

ЗНАТЬ:

- геометрию режущего инструмента;
- марки материала, из которого изготавливают режущий инструмент;
- принципы выбора режущего инструмента;
- особенности режущего инструмента;
- закономерности разрушения инструмента при различных видах обработки;
- процессы стружкообразования и типы получаемых стружек;
- основы расчета режущего инструмента;
- обозначение режущего инструмента.

УМЕТЬ:

- затачивать режущий инструмент;
- определять марку инструмента по нанесенной на нем маркировке;
- выбирать режущий инструмент для получения требуемой конфигурации детали;
- выбирать вспомогательный инструмент для установки режущего инструмента на станок;
- проектировать режущий инструмент;
- прогнозировать надежность и качество режущего инструмента;
- обрабатывать результаты полученные в ходе лабораторных работ;
- оформлять полученные результаты расчета согласно ГОСТ.

Изучение материала по дисциплине «Резание металлов и режущий инструмент» базируется на знаниях полученных при изучении курсов физики, теоретической механики, сопротивления материалов и материаловедения. Полученные знания необходимы для успешного изучения таких курсов как «Технология автоматизированного производства», «СК технологии машиностроения», для обоснованного выбора инструмента при необходимости обработать тот или иной конструкционный материал, ту или иную деталь.

Изучая данную дисциплину будут рассмотрены следующие темы:

1. Механика процесса резания;
2. Стойкость режущих инструментов;
3. Резцы;
4. Сверла, развертки, зенкеры;
5. Фрезы;
6. Долбяки;
7. Абразивный инструмент.

Каждая из тем будет заканчиваться контрольной точкой.

Курс «Резание металлов и режущий инструмент» рассчитан на два семестра. На лекционный материал в первом семестре отводится 48 часов, во втором – 16 часов. В первом семестре будут рассмотрены темы с 1 по 5, остальные во втором семестре.

В первом семестре каждое посещение лекции (а их будет 24) оценивается в 15 баллов, каждая контрольная точка 100 баллов, 140 баллов – экзамен.

550 баллов – допуск к экзамену.

651 – 750 баллов – тройка.

751 – 850 баллов – четверка.

851 балл и выше – пятерка.

Во втором семестре 8 лекций каждая оценивается по 15 баллов, 2 контрольные работы – по 100 баллов, 4 лабораторные работы – по 70 баллов, курсовой проект 400 баллов. На зачет необходимо набрать 800 баллов

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сысоев В.И. Резание металлов станки и инструмент. М.: МАШГИЗ, 1960. С. 480.
2. Полетика М.Ф. Теория резания. Ч. 1. Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2001. С. 202.
3. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Металлорежущие инструменты: Учебник. Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2003. С. 392.
4. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты»/ Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. М.: Машиностроение, 1989.
5. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС./ И.Л. Фадюшин, Я.А. Музыкант, А.И. Мещеряков и др. М.: Машиностроение, 1990.
6. Филиппов Г.В. Режущий инструмент. Л.: Машиностроение, 1981. С. 392.
7. Справочник инструментальщика./ И.А. Ординарцев, Г.В. Филлипов, А.Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, 1987.

Роль обработки резанием в машиностроительном производстве

Обработка резанием – наиболее распространенный способ обработки материалов, при котором необходимые форма и размеры деталей получают путем удаления с заготовок слоя материала (стружки).

Широкое применение в машиностроительном производстве обработки резанием обусловлено следующими достоинствами этого способа обработки материалов:

- Возможность достижения высокой точности обработки;
- Универсальность и высокая технологическая гибкость (пригодность для получения деталей любой формы, любых размеров и, за редким исключением, из любых материалов);

- Относительно не высокая энергоемкость;
- Экономичность.

К недостаткам этого метода обработки относится получение отходов в виде стружки, утилизация которой требует дополнительных затрат. Однако, общие тенденции развития методов обработки материалов, ведущие к уменьшению снимаемых припусков на всех этапах обработки деталей, существенно ослабляют этот недостаток.

Коротко об истории теории резания металлов.

Датой возникновения теории резания принято считать 1848 год, когда появилась первая научная публикация в этой области. Это была журнальная статья французского военного инженера Кокиля, в которой описывались опыты автора по измерению сил, действующих на инструмент при сверлении стволов артиллерийских орудий.

Последующее развитие науки о резании можно условно разделить на три периода, согласно книге Михаила Федоровича Полетики:

ПЕРВЫЙ ПЕРИОД (1848-1896 гг.) является периодом становления теории резания как самостоятельной отрасли науки. Для него характерны два направления исследований:

- 1) Экспериментальное определение сил, возникающих при работе различных режущих инструментов – это исследования Кларинваля (1862 г.) и Жоссея (1864 г.) во Франции, Гартинга (1872 г.) в Германии, Гауснера (1890 г.) в Австрии и др.;
- 2) Исследования процесса стружкообразования при резании как деформационного процесса. Это направление было начато русским горным инженером Тиме А.И. работой «Сопrotивление металла и дерева резанию» (1870 г.). эти исследования получили дальнейшее развитие в работах преимущественно русских ученых (Гадолина, Афанасьева, Зворыкина, Брикса и др.).

Во **ВТОРОМ ПЕРИОДЕ** развития теории резания (1896-1940 гг.) преобладающим направлением исследований становится изучение закономерностей изнашивания режущих инструментов, их работоспособности и производительности обработки резанием. В этом периоде появился новый инструментальный материал – быстрорежущая сталь, что позволило на порядок увеличить рабочие скорости в процессе резания.

Формальной датой начала второго периода обычно считают выход в свет в 1896 году книги Ф. Тейлора «Искусство резать металлы». Ее автор провел обширные экспериментальные исследования по работоспособности режущих инструментов и целесообразности тех или иных режимов обработки резанием.

Наибольший вклад в развитие теории резания на этом этапе внесли следующие ученые: Я.Г. Усачев (Россия, 1915 г.), впервые применивший металлографический метод для исследования процесса стружкообразования, а также экспериментально определивший температуру на рабочей поверхности инструмента; Розенгайн и Стерни (Англия, 1923 г.) и Розенберг А.М. (СССР, 1929 г.), исследовавшим закономерности формирования различных типов стружек; Г. Герберт (Англия, 1937 г.) измерил твердость в зоне стружкообразования и контактную температуру; Ф. Шверд (Германия, 1930 г.)

выполнил исследование температурных полей в зоне резания. Заметной вехой в развитии науки о резании является выход в свет энциклопедической монографии С.Ф. Глебова «Теория наивыгоднейшего резания металлов» (СССР, 1933 г.).

В целом второй период развития теории резания можно назвать периодом накопления экспериментальных данных.

ТРЕТИЙ ПЕРИОД является периодом разработки физических основ теории резания. Необходимость такой разработки была обусловлена, по крайней мере, двумя обстоятельствами:

- 1) появились новые инструментальный материалы: металлокерамические твердые сплавы (с 1929 г.) и минералокерамика (с 1936 г.), что привело к новому скачку рабочих скоростей резания;
- 2) резко расширилась номенклатура машиностроительных материалов, причем, главным образом, за счет труднообрабатываемых авиационных (а позже и космических) материалов.

В связи с этим стали формироваться научные школы в области резания металлов такие, как школа П. Оскли в Англии, М. Мерчанта в США, Х. Опитца в Германии, Н. Такеямы в Японии. В СССР в этой области работали научные коллективы технических ВУЗов в г. Москва (И.М. Беспрозванный, Г.И. Грановский, В.А. Кривоухов, А.И. Каширин, А.М. Даниелян, А.И. Исаев, Н.Н. Зорев, Е.П. Надеинская, А.Я. Малкин), в Томске (А.М. Розенберг), Н.Новгороде (М.И. Клушин), Харькове (Н.И. Резников, М.Ф. Семко), Самаре (А.Н. Резников, Б.А. Кравченко), Тбилиси (Т.Н. Лоладзе), Уфе (А.Д. Макаров). Трудями названных и других исследователей разработаны физические основы процесса стружкообразования, намечены пути теоретического решения вопросов износа и стойкости режущих инструментов.

В Томской научной школе резания металлов, основанной А.М. Розенбергом, была воспитана целая плеяда докторов наук, работавших и работающих как в Томске, так и в других городах России. Среди них А.Н. Еремин, М.Ф. Полетика, Г.Л. Куфарев, А.И. Промптов, М.Х. Утешев и др.

Третий период развития науки о резании нельзя считать закончившимся. Из-за сложности процессов, происходящих при резании, многие из них до сих пор остаются до конца не выясненными. К основным направлениям исследований последних лет относятся:

- 1) закономерности элементного стружкообразования;
- 2) контактные процессы при резании;
- 3) разработка математических моделей процесса стружкообразования;
- 4) физические основы управления процессами изнашивания и разрушения режущих инструментов;
- 5) поиск путей оптимизации условий резания по различным критериям.

МЕХАНИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Кинематика процесса резания.

Цель обработки резанием – получение деталей заданных форм и размеров. С геометрических позиций задача обработки сводится к получению с заданной точностью поверхностей того или иного вида. Решение этой задачи требует, помимо выбора режущего инструмента необходимой конфигурации и правильного его расположения относительно заготовки, еще и создания относительного движения инструмента и заготовки по определенным траекториям. При этом в зависимости от вида режущего инструмента и формы указанных траекторий оказываются заданными форма и размеры поперечного сечения снимаемого слоя с материала, которые могут быть как постоянными, так и переменными во времени. В свою очередь, параметры этого сечения определяют силовые, тепловые и точностные характеристики процесса резания.

С указанными кинематическими факторами связаны и геометрические параметры лезвия инструмента, т.е. рабочие углы, которые зависят не только от способа заточки, но также от взаимного расположения инструмента и заготовки и соотношения скоростей их движений.

Перечисленные вопросы изучаются в **кинematике резания** и могут быть разделены на три группы:

- 1) кинематические схемы резания;
- 2) рабочие углы лезвия и их зависимость от взаимного расположения инструмента и заготовки и от соотношения скоростей их относительного движения;
- 3) форма и размеры снимаемого слоя и закономерности их изменения во времени.

Выбор наиболее целесообразной кинематической схемы резания, обеспечивающей получение заданной поверхности, зависит от большого числа причин, в том числе:

- 1) вида воспроизводимой поверхности;
- 2) ее протяженности;
- 3) требований к точности ее воспроизведения;
- 4) типа производства (единичное, серийное, массовое).

При этом одну и ту же поверхность в большинстве случаев можно получить различными способами, меняя траектории относительного движения инструмента и заготовки, и конструкцию самого инструмента, то есть, применяя разные **кинематические** схемы резания. Так, например, внутреннюю цилиндрическую поверхность кольца можно получить:

а) совмещая вращение заготовки вокруг своей оси с поступательным движением инструмента вдоль образующей цилиндрической поверхности (расточивание);

б) совмещая вращение заготовки с поступательным движением широкого инструмента в радиальном направлении (фасонное расточивание);

в) совмещая вращательное движение инструмента с его поступательным перемещением вдоль оси неподвижной заготовки (сверление, зенкерование, развертывание);

г) поступательным перемещением фасонного инструмента вдоль оси неподвижной заготовки (протягивание).

По исследованиям Г.И. Грановского принципиально возможных кинематических схем резания насчитывается около 300, причем большинство нашли применение в механической обработке. Знание их необходимо при проектировании режущего инструмента и технологического оборудования.

Кинематика продольного точения.

Роль инструмента при продольном точении выполняет **проходной токарный резец**. Его режущая часть – лезвие, в простейшем случае (рис. 1) представляет собой трехгранный телесный угол с вершиной в точке б, ограниченный рабочими гранями (поверхностями) 1,2,3.

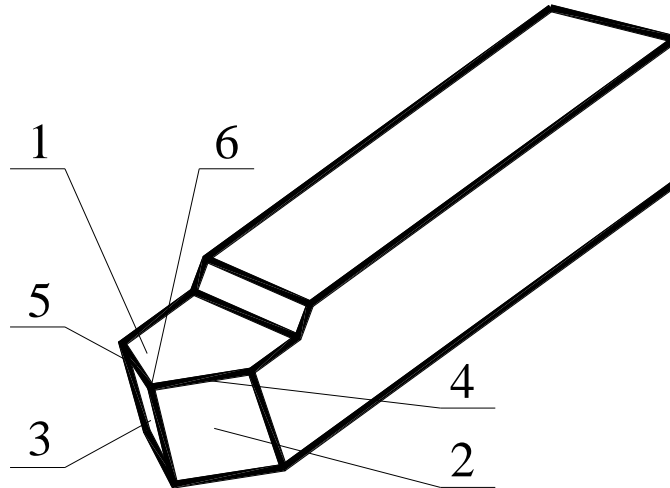


Рис.1. Прходной токарный (или строгальный) резец

Первая из них (1) называется **передняя поверхность** – это поверхность, по которой сходит стружка.

Две другие, контактирующие с вновь образованной поверхностью, называются **задними поверхностями**: **главной** (2) и **вспомогательной** (3).

Линия пересечения главной задней поверхности с передней поверхностью называется **главной режущей кромкой** (4).

Линия пересечения вспомогательной задней поверхности с передней – **вспомогательной режущей кромкой** (5).

При продольном точении (рис.2) относительное движение инструмента и заготовки складывается из двух движений: вращение заготовки вокруг ее собственной оси с числом оборотов n в единицу времени и поступательного движения в направлении, параллельном оси заготовки. Это последнее движение в большинстве случаев (хотя и не всегда) сообщается суппорту с закрепленным на нем инструментом. Первое из этих движений называется **главным движением резания**, второе – **движением подачи**.

Результирующее движение инструмента относительно заготовки происходит по винтовой траектории. В результате обработки с заготовки удаляется припуск в виде кольца толщиной t . Параметр t измеряется в радиальном направлении и называется **глубиной резания**.

Исходную поверхность заготовки называют **обрабатываемой**, а поверхность, получившуюся после прохождения резца, – **обработанной**.

Поверхность, соединяющая обрабатываемую и обработанную поверхности называется **поверхностью резания**. Эта поверхность является винтовой.

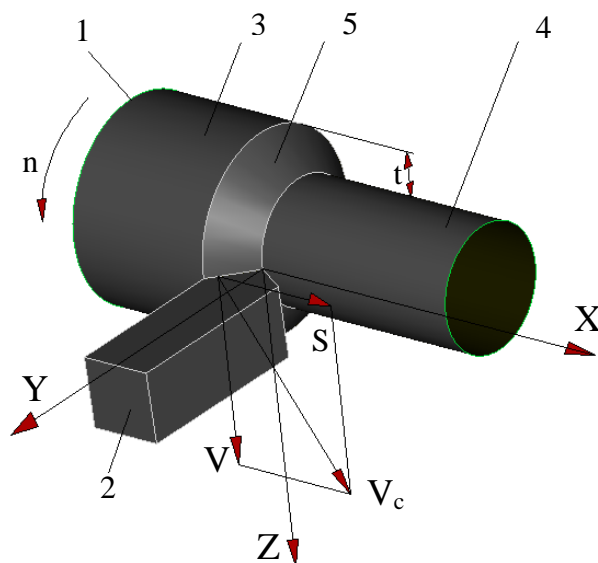


Рис.2. Кинематическая схема продольного точения: 1 – заготовка; 2 – резец; 3 – обрабатываемая поверхность; 4 – обработанная поверхность; 5 – поверхность резания; n – число оборотов заготовки; V – скорость резания; S – скорость движения подачи; V_c – результирующая скорость; t – глубина резания

Окружная скорость главного движения резания называется **скоростью резания**. Ее величина не одинакова в различных точках режущей кромки и определяется известной формулой:

$$V = \pi d_1 n ,$$

где d_1 – диаметр, соответствующий заданной точке на режущей кромке. Т.к. обычно глубина резания много меньше обрабатываемого диаметра, поэтому при расчетах (за исключением особых случаев) принимают $d_1 = d$, пренебрегая, таким образом, изменением скорости вдоль режущей кромки.

Скорость движения подачи S при продольном точении принято оценивать величиной поступательного перемещения инструмента за один оборот заготовки, и называют подачей на оборот S_0 . В отличие от скорости резания величина подачи одинакова во всех точках режущей кромки.

Результирующая скорость V_c относительного движения инструмента и заготовки является векторной суммой скоростей резания и движения подачи. Плоскость, в которой лежат векторы \vec{V} , \vec{S} , \vec{V}_c параллельна координатной плоскости XZ (рис.2) и называется **рабочей плоскостью**, обозначается P_s .

Геометрические параметры лезвия инструмента.

Производственные показатели обработки резанием: точность, шероховатость обработанной поверхности, работоспособность инструмента и др. во многом зависят от взаимного расположения поверхностей заготовки и рабочих поверхностей инструмента, которые, в свою очередь, определяются тем, как инструмент заточен и как он установлен на станке. Для облегчения расчета, а также заточки и измерения геометрических параметров лезвия стандартом установлены специальные системы прямоугольных координат и координатных

плоскостей. Таких систем координат предусмотрено три: статическая (ССК), кинематическая (КСК), инструментальная (ИСК).

Статическая система координат ориентирована по вектору скорости резания \bar{V} , параллельно которому направлена ось Z. При продольном точении две другие оси направлены соответственно: параллельно (ось X) и перпендикулярно (ось Y) оси заготовки (рис.2).

Кинематическая система координат ориентирована по вектору результирующей скорости \bar{V}_c (ось Z). Направления двух других осей при этом выбирают в зависимости от поставленной задачи.

Координатная плоскость XY перпендикулярная вектору скорости \bar{V} (ССК) или \bar{V}_c (КСК) называется, соответственно, **основной статической** или **основной кинематической** плоскостью (P_v).

Если статическая и кинематическая системы координат связаны с параметрами относительного движения инструмента и заготовки, то **инструментальная система координат** связана непосредственно с инструментом, а именно, с поверхностями, по которым инструмент базируют при его установки на станке или при заточке.

Для проходного резца такой поверхностью является плоскость его основания, которая является **основной инструментальной** плоскостью. Ось Z направлена ей перпендикулярно.

В рассмотренном нами случае (рис.2) продольного точения статическая система координат совпадает с инструментальной.

К геометрическим параметрам лезвия инструмента относятся углы, определяющие относительное расположение его рабочих поверхностей, радиусы криволинейных режущих кромок, размеры фасок и ленточек и т.п. Значения любого из названных параметров зависят от того, в каком сечении его измеряют. Поэтому для обеспечения единого подхода к их определению взаимное расположение этих сечений стандартизовано. Помимо рабочей плоскости, существует три секущих, как правило, перпендикулярных к **основной плоскости**, обозначается P_v .

Плоскость резания – проходит (содержит) через главную режущую кромку касательно к поверхности резания и обозначается P_n .

Главная секущая плоскость – проходит перпендикулярно проекции главной режущей кромки на основную плоскость и обозначается P_1 .

Вспомогательная секущая плоскость – перпендикулярна проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость, обозначается P_1 .

На рис.3 показано сечение зоны резания при продольном точении основной плоскостью P_v , проходящей через ось заготовки и вершину лезвия резца. На практике подобное положение основной плоскости соответствует случаю, когда резец «установлен по центру».

В основной плоскости измеряются радиус при вершине r_v и следующие углы:

Главный угол в плане ϕ - угол между плоскостью резания и обрабатываемой поверхностью;

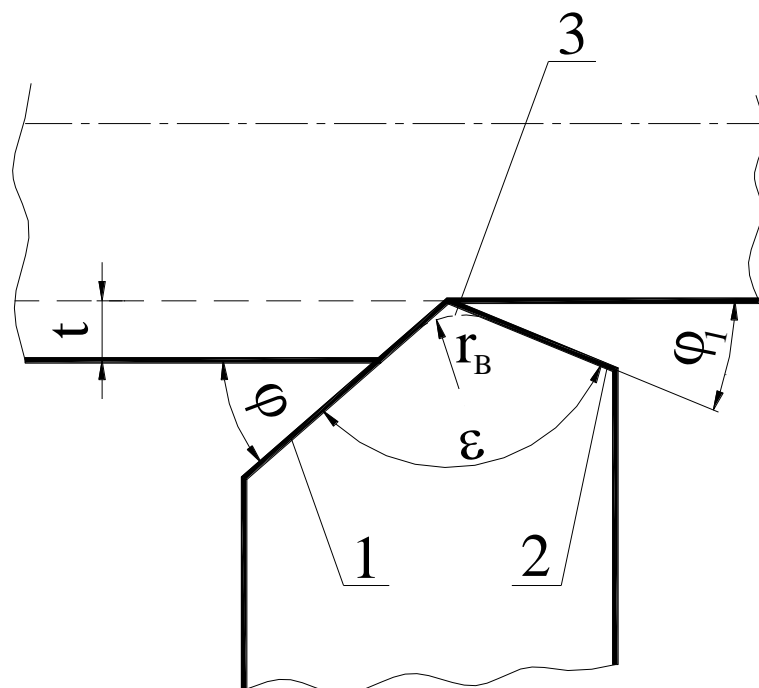


Рис. 3. Геометрические параметры лезвия резца в основной плоскости: 1 – главная режущая кромка; 2 – вспомогательная режущая кромка; 3 – переходная режущая кромка; φ - главный угол в плане; φ_1 – вспомогательный угол в плане; ε – угол при вершине в плане; $r_{в}$ – радиус кривизны при вершине в плане.

Вспомогательный угол в плане φ_1 – угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и обработанной поверхностью;

Угол при вершине ε в плане – угол между главной и вспомогательной режущими кромками.

В главной секущей плоскости измеряются следующие углы:

Главный передний угол γ - угол между передней поверхностью и плоскостью перпендикулярной плоскости резания и проходящей через главную режущую кромку. Этот угол отсчитывается по часовой стрелке и будет положительным, когда передняя поверхность располагается ниже вершины резца. При криволинейной передней поверхности главный передний угол измеряется между касательной к этой поверхности в точке на главной режущей кромке и основной плоскостью.

С целью повышения работоспособности инструмента нередко вдоль главной режущей кромки затачивают плоскую фаску шириной f . В этом случае геометрия передней поверхности определяется двумя передними углами: углом на фаске γ_f и углом за фаской γ .

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

Угол заострения β – угол между передней и главной задней поверхностями;

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

Фактические значения главного переднего и главного заднего углов зависят не только от заточки, но и от установки инструмента относительно заготовки.

Во вспомогательной секущей плоскости можно увидеть – **вспомогательный задний угол α_1** . Это угол между вспомогательной задней поверхностью и плоскостью проведенной через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно основной плоскости.

В плоскости резания измеряется угол λ . Он называется **угол наклона главной режущей кромки** или **угол в плоскости резания**. Угол λ определяет наклон главной режущей кромки относительно основной плоскости и считается **положительным**, если вершина резца является низшей точкой главной режущей кромки и **отрицательным**, если вершина резца является наивысшей точкой главной режущей кромки. Если главная режущая кромка параллельна основной плоскости, то угол $\lambda = 0$, при этом вектор скорости резания \vec{V} составляет с главной режущей кромкой прямой угол. Соответствующая этому случаю схема резания называется **прямоугольным резанием**. Во всех остальных случаях, когда $\lambda \neq 0$, будем иметь косоугольное резание.

Размеры и форма поперечного сечения среза.

При продольном течении резец удаляет слой материала в виде ленты шириной **b** и толщиной **a** . Будем называть этот слой **срезаемым слоем**, а параметры **b** и **a** – соответственно **шириной среза** и **толщиной среза**.

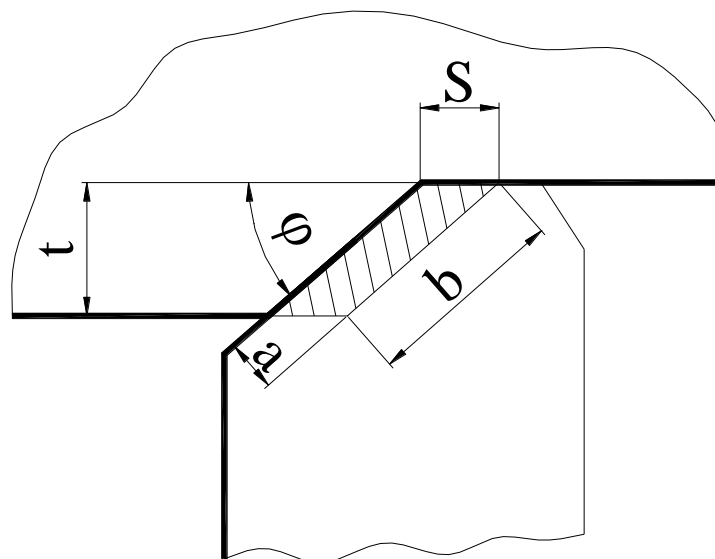


Рис. 4. Поперечное сечение срезаемого слоя для случая, когда $r_b = 0$; $\phi_1 = 0$ (t – глубина резания, S - подача, b – ширина среза, a – толщина среза)

В простейшем случае, когда ϕ_1 и $r_b = 0$ (рис. 4), поперечное сечение среза представляет собой параллелограмм, а его **физические параметры a и b** связаны с глубиной резания t и подачей S , которые называются **технологическими параметрами сечения среза**, следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} a &= S \cdot \sin \varphi \\ b &= \frac{t}{\sin \varphi} \end{aligned} \right\}.$$

Площадь поперечного сечения среза в рассматриваемом случае равна:

$$f = a \cdot b = St. \quad (1)$$

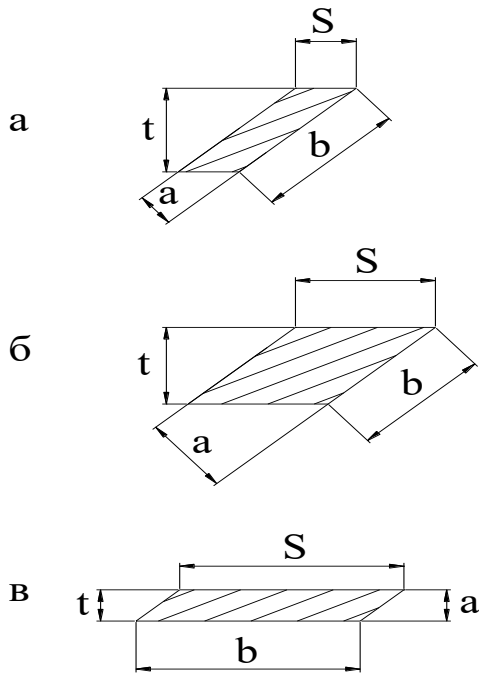


Рис. 5. Поперечное сечение срезаемого слоя при различном соотношении между глубиной резания и подачей: а – прямой срез; б – равнобокий срез; в – обратный срез

В практике обработки резанием соотношение между глубиной резания и подачей меняется в широких пределах. Обычно глубина резания больше подачи ($t > S$), но при $\varphi_1 = 0$ не исключены случаи обработки с обратным соотношением: $t < S$ (получистовая обработка). Общий диапазон изменения соотношения t/S условно делится на три части (рис. 5): прямые срезы ($t > S$), равнобокие срезы, когда параметры t и S имеют близкие численные значения, и обратные срезы ($t < S$). Легко увидеть, что в последнем случае физические параметры сечения среза поменялись местами: толщина среза определяется теперь глубиной резания, а ширина среза – подачей.

Равнобокие срезы занимают промежуточное положение, при котором нет отчетливой разницы между шириной и толщиной среза.

Перейдем к рассмотрению более общего случая, сохранив условие $r_b = 0$, но приняв $\varphi_1 > 0$ (рис. 6). В этом случае поперечное сечение среза уже не параллелограмм, а неравнобокая трапеция. При такой форме поперечного сечения среза его площадь будет меньше площади, полученной по формуле (1) на величину площади $f_{ост}$ гребешка, остающегося на обработанной поверхности заготовки и формирующего шероховатость ее поверхности:

$$f = St - f_{ост}. \quad (2)$$

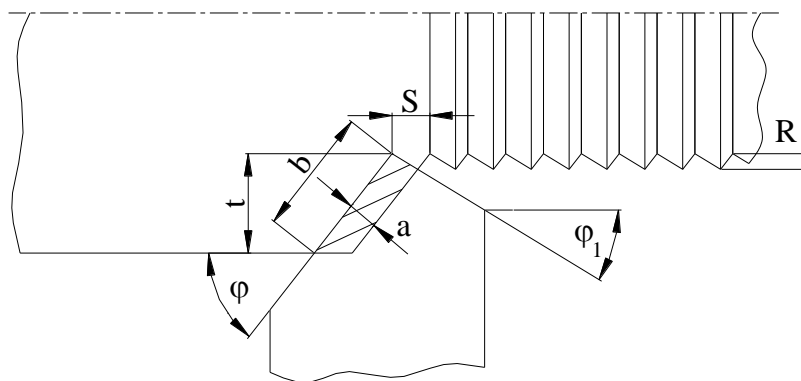


Рис. 6. Форма поперечного сечения срезаемого слоя при $r_b=0$; $\varphi_1 > 0$ (R – номинальная высота шероховатости на обработанной поверхности)

В рассматриваемом случае

$$f_{ост} = \frac{1}{2} SR, \quad (3)$$

где R – номинальная высота поверхностных неровностей ($R=R_Z=R_{max}$). Подставив выражение (3) в формулу (2) получим:

$$f = S(t - 0,5R).$$

Как правило, при прямых срезах глубина резания даже при чистовой обработке, по крайней мере, на порядок превышает высоту неровностей. Поэтому площадь $f_{\text{ост}}$ составляет всего несколько процентов от площади поперечного сечения среза и в подавляющем большинстве случаев можно ей пренебрегать, полагая $f = St$.

Наличие радиуса при вершине реза не вносит принципиальных изменений в изложенные ранее соображения. В этом случае изменяется лишь величина $f_{\text{ост}}$, причем в сторону уменьшения.

В общем случае криволинейной режущей кромки поперечное сечение среза имеет сложную форму. Графически она получается путем смещения всех точек режущей кромки в направлении движения подачи на одинаковую величину, равную подаче S . Так как по смыслу понятия о толщине среза ее следует измерять по нормали к режущей кромке, то она в данном случае будет переменной вдоль режущей кромки, уменьшаясь по направлению к вершине лезвия. Что касается ширины среза, то она будет условно определяться длиной рабочего участка криволинейной режущей кромки.

Таким образом, форма поперечного сечения среза определяется формой режущей кромки в пределах ее рабочего участка.

По мере усложнения формы режущей кромки усложняется и форма поперечного сечения срезаемого слоя, а процесс удаления этого слоя становится более затрудненным, менее свободным. В этом смысле оптимальной будет схема резания, когда со срезаемым слоем взаимодействует всего одна прямолинейная режущая кромка. Такая схема называется схемой **свободного резания**. Примером ее реализации при точении может быть: снятие фаски, уменьшение диаметра узкого буртика на валу, обтачивание червяка.

Схема резания, при которой рабочий участок единственной режущей кромки криволинейна, либо с заготовкой взаимодействует две или более прямолинейных режущих кромок, называется схемой **несвободного резания**.

Деформация при резании

Обработка резанием, как и все виды обработки давлением, сопряжена с пластическим деформированием обрабатываемого материала. Однако, если при обработке давлением деформированию подвергается вся заготовка (или значительная ее часть), то при обработке резанием деформация почти на 100 % сосредотачивается в удаляемом слое, превращаемом в стружку. Поэтому образующаяся при резании стружка является основным источником сведений о происшедших деформационных процессах и сопровождающих их явлениях.

В зависимости от условий резания формирующиеся стружки различают по размерам и форме поперечного сечения, а также по их внутреннему и внешнему строению. Можно выделить две основные разновидности стружек: **сливные** и **элементные**.

Сливная стружка представляет собой сплошную ленту постоянного поперечного сечения. В зависимости от условий на передней поверхности такая стружка может образовывать завитки и спирали разного радиуса, либо сходить

прямой лентой. Однако форма и размеры поперечного сечения стружки при этом остаются неизменными во времени, что свидетельствует о стабилизации деформационного процесса. Такой процесс принято называть **процессом сливного стружкообразования**.

Элементная стружка состоит из отдельных кусочков – элементов, размеры которых сопоставимы с толщиной среза. Прочность их связи друг с другом зависит от условий резания, изменяясь от весьма прочной (так называемая **суставчатая** стружка, является переходным типом от сливной к элементной) до полного разделения элементов.

Процесс элементного стружкообразования, в отличие от сливного, характеризуется периодическим изменением во времени всех его параметров, причем эти изменения чаще всего носят не регулярный характер. Эти особенности затрудняют изучение элементного стружкообразования, поэтому основные закономерности в механике процесса резания исследованы и установлены для сливного стружкообразования.

Рассмотрим прямоугольное свободное строгание (рис. 7), характеризующееся прямолинейной траекторией главного движения резания.

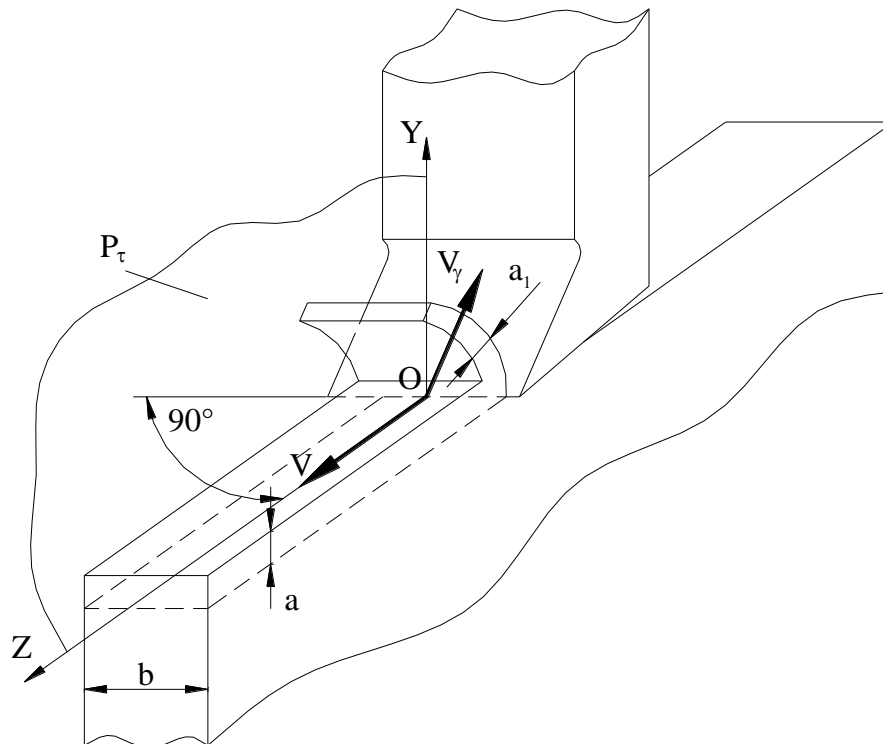


Рис. 7. Схема прямоугольного свободного строгания: P_τ - главная секущая плоскость, являющаяся плоскостью симметрии зоны резания; b – ширина среза; a – толщина среза; a_1 – толщина стружки; V – скорость главного движения; V_γ - скорость движения стружки по передней поверхности

Назовем **зоной резания** совокупность непосредственно взаимодействующих друг с другом участков лезвия, заготовки и стружки. Рассечем зону резания главной секущей плоскостью, проходящей через точку O , делящую пополам загруженную часть режущей кромки. Эта плоскость, в данном случае, будет являться плоскостью симметрии зоны резания.

Полученное сечение зоны резания представлено на рисунке 8. Помимо уже известных параметров, на нем указана скорость V_γ перемещения стружки по передней поверхности, размеры площадок контакта на передней (c) и задней (h_3) поверхностях, а также обозначена толщина a_1 образующейся стружки.

Из схемы следует, что в зоне резания происходят следующие физические процессы:

- 1) пластическое деформирование срезаемого слоя толщиной a , превращающегося в стружку толщиной a_1 ;
- 2) взаимодействие стружки с передней поверхностью, сопровождаемое интенсивным трением и значительными контактными деформациями;
- 3) трение задней поверхности лезвия (на участке контакта h_3) о поверхность резания;
- 4) образование новых поверхностей вследствие отделения срезаемого слоя от заготовки. Таковыми являются контактная поверхность стружки и поверхность резания.

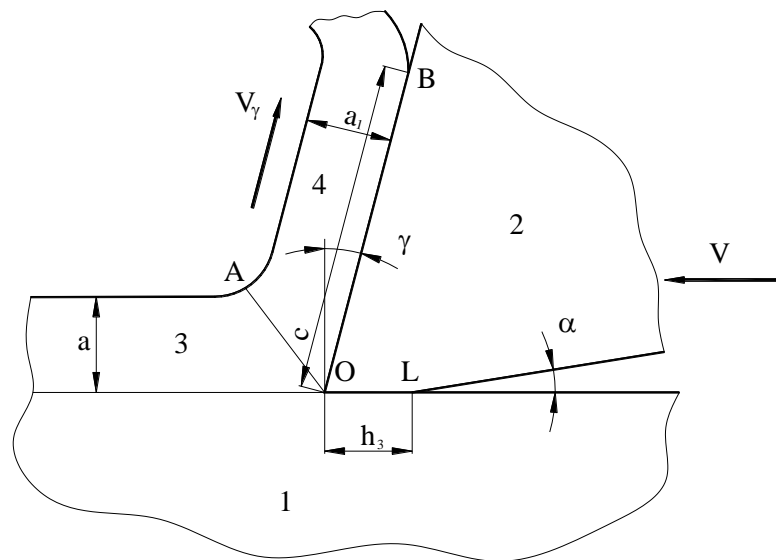


Рис. 8. Строение зоны резания в ее сечении главной секущей плоскостью: 1 – заготовка; 2 – резец; 3 – срезаемый слой; 4 – стружка; OA – условная граница, отделяющая срезаемый слой от стружки; B – точка, в которой стружка отходит от передней поверхности; $c=OB$ – длина контакта стружки с резцом; L – точка, ограничивающая контакт задней поверхности инструмента с поверхностью резания; $h_3=OL$ – ширина ленточки контакта по задней поверхности; γ – главный передний угол; α – главный задний угол

Из названных четырех физических процессов доминирующую роль играет процесс деформирования срезаемого слоя, который характеризуется большими степенями и высокими скоростями деформации и потребляет большую часть энергии, затрачиваемой на резание.

Как известно из курса «Сопротивления материалов» деформированное состояние в точке трехмерного пространства, занимаемого трехмерным телом определяется шестью компонентами: тремя линейными ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z и тремя угловыми γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} . Если в пределах данного тела во всех его точках все компоненты деформации одинаковы, то деформированное состояние этого тела называется **однородным**. В противном случае – **неоднородное** деформирование.

Деформированное состояние может быть **объемным**, если все компоненты деформации отличны от нуля, **плоским**, когда три из них равны нулю и **линейным**, когда значимым остается лишь одна из линейных компонент деформации.

В общем случае в зоне резания возникает объемное неоднородное деформированное состояние, анализ которого затруднен.

В рассматриваемом случае прямоугольного свободного строгания деформированное состояние в зоне резания также объемное: при экспериментальном исследовании обнаруживается деформация в направлении всех трех осей X, Y, Z. В результате такого деформирования поперечное сечение срезаемого слоя, имеющего форму правильного прямоугольника, в стружке превращается в криволинейную трапецию. При сравнении параметров этих сечений оказывается, что деформация по толщине (вдоль оси Y) существенно превышает деформацию по ширине (ось Z) причем их соотношение не одинаково при различных значениях отношения **b/a**.

В рассматриваемом случае с ростом отношения b/a форма поперечного сечения среза приближается к прямоугольной, а относительное изменение при деформации ширины среза (b_1/b в направлении X) уменьшается. Следовательно, деформированное состояние в зоне резания в этом случае приближается к плоскому. По данным Н.Н. Зорева деформированное состояние в зоне резания может рассматриваться как плоское уже при соотношении $b/a \geq 10$.

Воспользовавшись рисунком 8 можно оценить деформацию поперечного сечения двумя коэффициентами:

коэффициентом утолщения $K_a = \frac{a_1}{a}$

и коэффициентом уширения $K_b = \frac{b_1}{b}$.

Их произведение определяет изменение площади поперечного сечения среза и выражается K_f – отношением площадей поперечных сечений стружки и срезаемого слоя. Это отношение приравнивается к отношению длины срезаемого слоя и длины стружки, выражается коэффициентом **K_l – коэффициент укорочения** или **усадки** стружки по длине.

Параметры K_a , K_b , K_l не дают точного значения деформации при резании, но легко определяются экспериментально. Наиболее просто определяется коэффициент укорочения стружки. Для этого достаточно измерить длину стружки l_1 . Длина l срезаемого слоя, в рассмотренном нами случае, равна длине заготовки. В других случаях длина l определяется «весовым» методом. Этот метод заключается в следующем, любой кусок снятой стружки взвешивают, после чего находят его объем как частное веса стружки на удельный вес обрабатываемого материала, а затем, зная параметры ширины и толщины срезаемого слоя, находят длину срезаемого слоя.

При необходимости определения коэффициентов K_a , K_b определяют поперечные размеры стружки с помощью микрометра.

Распределение деформаций в зоне резания.

Определения коэффициентов K_a , K_b , K_l позволяют оценить лишь конечный результат деформационного процесса в срезаемом слое и при том усредненный

по сечению стружки. Знание же протекания процесса деформирования в сечении стружки необходимо для анализа процесса стружкообразования и решение ряда технологических задач. Для решения задачи распределения деформации в зоне резания разработаны специальные методы, которые можно разделить на две группы:

- 1) методы, основанные на изучении боковой поверхности зоны резания;
- 2) методы, предусматривающие получение сечений этой зоны главной секущей плоскостью с последующим их исследованием.

К первой группе относятся:

- 1) наблюдение боковой поверхности невооруженным глазом;
- 2) ее наблюдение через микроскоп;
- 3) киносъемка боковой поверхности.

По первому методу точат пластину, боковая поверхность которой отполирована. В тех местах, где происходит пластическая деформация, поверхность пластины тускнеет.

Оптический метод позволяет увидеть лишь одну из границ пластически деформируемой области, не давая никакой информации о деформированном состоянии внутри нее. Применение микроскопа немногим превосходит визуальный метод.

Третий метод наиболее результативен для исследования внешних контуров зоны резания, если они изменяются во времени.

Ко второй группе методов относятся два: металлографический и метод сеток.

Сущность первого метода заключается в следующем (Усачев Я.Г.). Процесс резания в нужный момент времени останавливают, резец отводят. Часть заготовки с зоной резания и стружкой вырезают. Боковую поверхность выреза шлифуют приближаясь к плоскости симметрии зоны резания. Затем из «корня стружки» приготавливают металлографический шлиф, который изучают под микроскопом.

На шлифе под увеличением можно увидеть по искажениям деформированных зерен постепенный переход от недеформированного материала в срезаемом слое к полностью продеформированному в стружке. Микрофотографии металлографического шлифа можно использовать для количественной оценки распределения деформации в зоне резания. Однако из-за нерегулярности формы и размеров зерен исходной структуры материала точность результатов такой оценки очень низка. Поэтому металлографический метод применяют лишь для качественной оценки деформации.

Наиболее полную информацию о распределении деформаций в зоне резания дает метод координатных сеток. Для результативного применения этого метода необходимо чтобы координатная сетка, наносимая на материал, оставалась плоской. Это достигается путем изготовления двух пластин с полированными торцами, на одной из пластин наносят координатную сетку. Пластины плотно прижимают друг к другу, чтобы сетка оказалась внутри, и устанавливают на станке.

Форма ячейки чаще всего представляет квадрат. Чем меньше ячейка, тем выше должна быть разрешающая способность метода сеток. Однако с

уменьшением ячеек сетки снижается точность измерения их деформационных искажений. Кроме того, когда размеры ячейки сетки приближаются к размерам зерен материала, возникают дополнительные искажения сетки, затрудняющие оценку деформации.

Процесс образования сливной стружки – непрерывный процесс пластического течения материала, проходящего через зону резания. При этом линии сетки, имеющие горизонтальное направление, являются одновременно **линиями тока**, т.е. траекториями движения через эту зону частиц деформируемого материала. Первоначально вертикальные линии сетки отражают последовательные во времени положения движущихся частиц (элементарных объёмов) по пути их движения.

Чтобы оценить комплексную характеристику плоского деформированного состояния рассмотрим схему деформационных искажений ячеек сетки (рис. 9).

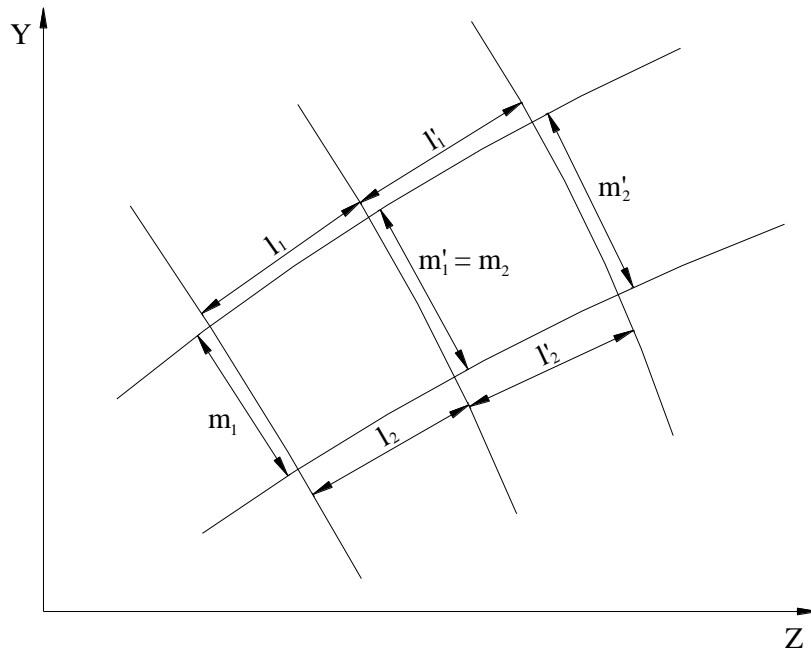


Рис. 9. Схема определения деформационных искажений ячеек координатной сетки

Для упрощения будем полагать, что внутри каждой ячейки имеет место однородное деформированное состояние, определяемое средним для данной ячейки значением компонент деформации.

Обозначим длины спрямленных границ соседних ячеек соответственно через $l_1, l_2; l'_1, l'_2; m_1, m_2; m'_1, m'_2$. тогда средние размеры этих ячеек определяются:

$$l_{\text{ср}} = \frac{l_1 + l_2}{2}; \quad l'_{\text{ср}} = \frac{l'_1 + l'_2}{2};$$

$$m_{\text{ср}} = \frac{m_1 + m_2}{2}; \quad m'_{\text{ср}} = \frac{m'_1 + m'_2}{2}.$$

приращение деформации при переходе от одной ячейки к другой будут равны

$$\varepsilon_l = \frac{l'_{\text{ср}} - l_{\text{ср}}}{l_{\text{ср}}}; \quad \varepsilon_m = \frac{m'_{\text{ср}} - m_{\text{ср}}}{m_{\text{ср}}}.$$

Длины отрезков l_i, m_i измеряют непосредственно на деформированной сетке. Также непосредственным измерением находят углы α_i и β_i как средние

между теми, которые стороны l_i и m_i каждой из ячеек образуют с осями Y и Z соответственно (рис. 9).

Зная значения компонент деформации в направлениях l и m , а также углы α и β , нетрудно с помощью соотношений перехода от одной системы координат к другой, найти для каждой ячейки сетки компоненты деформации в координатной системе YZ: ε_y , ε_z , γ_{yz} , а также подсчитать комплексную характеристику плоского деформированного состояния

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{3}{2} \gamma_{yz}^2},$$

называемую **интенсивностью деформаций сдвига**.

Оба рассмотренных метода требуют для своей реализации надежной **фиксации зоны резания**, т.е. неповрежденного «корня стружки».

Остановить процесс резания с сохранением корня стружки неповрежденным возможно при небольших скоростях. При более высоких скоростях используют различные приспособления для мгновенного вывода резца из зоны резания...

Используя данные обсчета деформированной координатной сетки можно определить **скорость деформации**:

$$\dot{e} = \frac{de_i}{d\tau} \frac{1}{c},$$

где τ - время.

При скорости резания $V = 1,65$ м/с скорость деформации достигает значения $1,8 \cdot 10^4$ 1/с. При более высоких скоростях резания характерных для современного производства (5 – 7 м/с), скорость деформации на порядок выше. Для сравнения при прокате, таком же непрерывном процессе деформирования – скорость деформирования имеет порядок $10^2 - 10^3$ 1/с, а при типовых статических механических испытаниях (на растяжение, сжатие и т.д.) – колеблется в пределах $10^{-4} - 10^{-2}$ 1/с.

Напряжения и силы в зоне резания

Для условий плоского деформированного состояния, как это было рассмотрено при анализе распределения деформаций в зоне резания, число компонент напряжений сокращается до трех.

В качестве обобщенной характеристики напряженного состояния принимают **интенсивность касательных напряжений** σ_i , которая при плоском деформируемом состоянии определяется формулой:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (4)$$

Нетрудно показать, что при переходе к главным осям напряженного состояния выражение (4) принимает вид

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = \sqrt{3} \tau_{\max},$$

следовательно в случае плоского деформированного состояния интенсивность касательных напряжений σ_i пропорциональна максимальному касательному напряжению τ_{\max} .

В зависимости от применяемых методов исследования и конкретного назначения получаемых с их помощью результатов, проблема определения напряженного состояния в зоне резания подразделяется на три задачи, решаемые обычно самостоятельно:

- 1) распределение напряжений в упругой области зоны резания;
- 2) распределение напряжений в пластической области;
- 3) распределение контактных напряжений на рабочих поверхностях инструмента.

Напряженное состояние в упругой области зоны резания исследовалось при помощи поляризационно-оптического метода, как наиболее подходящего. Этот метод основан на свойстве ряда прозрачных материалов обнаруживать в нагруженном состоянии оптическую анизотропию. Метод применялся в основном для решения плоских задач. Исследования показывают, что упругая область зоны резания подвергается двум напряжениям: сжатию и растяжению. Перед резцом сжатие, после – растяжение.

С помощью поляризационно-оптического метода можно получить достаточно полную картину распределения напряжений в упругой области зоны резания, что имеет самостоятельное значение при решении некоторых задач, например, анализ закономерностей возникновения остаточных напряжений в деталях, обработанных резанием.

Напряженное состояние в пластической области зоны резания. Эта задача более сложная, чем предыдущая. Изучение напряженного состояния в этой области ведется несколькими методами, один из них **метод сеток**. Это дальнейшее развитие описанного ранее: сначала по деформационным искажениям координатной сетки находят деформации, затем по ним рассчитывают напряжения. При этом в основе расчета лежит гипотеза о существовании **единой кривой течения** (для всех видов деформированного состояния).

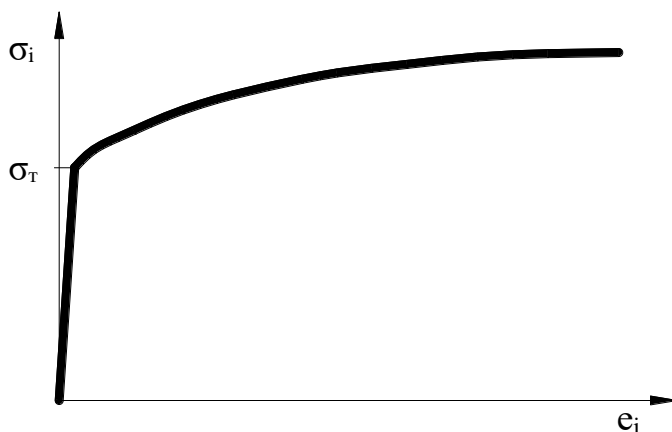


Рис.10. Типичная кривая пластического течения упрочняющегося материала.

Практически это означает, что кривая течения $\sigma_i(\epsilon_i)$ строится по данным опытов с каким-либо простым видом напряженно-деформационного состояния (*простое растяжение*), а затем используется для определения напряжений в узлах искаженной координатной сетки, полученной при резании.

Типичная кривая зависимости между обобщенными характеристиками деформации и напряжения $\sigma_i(\epsilon_i)$, так называемая **кривая течения**, приведена на рис.10. Чаще всего кривую течения аппроксимируют степенной формулой

$$\sigma_i = B \varepsilon_i^n, \quad (5)$$

в которой коэффициент B зависит от предела текучести деформируемого материала, а **показатель упрочнения** n - от склонности этого материала к деформационному упрочнению.

Отметим, что при плоском деформированном состоянии вместо формулы (5) можно применить ей адекватную зависимость $\tau = Bg^n$, в которой g - плоская сдвиговая деформация, а τ - соответствующее ей касательное напряжение.

Другой метод изучения напряженного состояния в пластической области, – это метод твердости. В отличие от метода сеток в этом методе в качестве исходной информации используется не деформация, а величина (степень) деформационного упрочнения, достигнутого в каждой точке пластической области. Степень упрочнения определяется по результатам измерения твердости в соответствующей точке. Твердость измеряется способом вдавливания индентора (обычно алмазной пирамиды) в деформируемый материал.

В основе метода твердости лежит гипотеза о существовании однозначной связи между твердостью H в каждой точке деформированного материала и напряжением, действовавшим в этой точке в процессе деформирования. В качестве меры напряжения применяется интенсивность касательных напряжений. Экспериментальная проверка показывает удовлетворительную достоверность этой гипотезы.

Практическая реализация метода твердости сводится к следующему. При любом плоском нагружении получают экспериментальную кривую $\sigma_i(H)$ для деформируемого материала. Затем измеряют твердость в различных точках поверхности деформированного тела, располагая для удобства эти точки по координатам. При этом исследуемую поверхность предварительно шлифуют (для получения геометрически правильных и четких отпечатков индентора), а при необходимости определения твердости внутри тела делают в соответствующих местах срезы. Наконец, с помощью тарировочной кривой $\sigma_i(H)$ находят значения интенсивности касательных напряжений в местах замеров твердости. Соединяя точки равной твердостью получают кривые постоянной твердости – **изосклеры** ($H = \text{const}$), являющиеся одновременно линиями постоянной интенсивности касательных напряжений ($\sigma_i = \text{const}$).

Для определения всех компонент напряженного состояния в пластической области зоны резания экспериментально полученная картина изосклер используется как основа последующих вычислений, аналогично, как при методе сеток. Это и определяет невысокую точность метода твердости, как экспериментального способа исследования распределения напряжений при резании. Другой недостаток этого метода – невозможность его применения для условий резания характеризующихся повышенными температурами в пластической области, когда твердость является функцией не только деформационного упрочнения, но и термического разупрочнения, вызванного действием нагрева.

Исследования А.М. Розенберга и Л.А. Хворостухина (по схеме с единственной плоскостью сдвига), измерявших среднюю твердость стружки методом вдавливания алмазной пирамиды для разных обрабатываемых материалов, показали, что между твердостью стружки H_V и средним

касательным напряжением τ_ϕ , действовавшим в процессе формирования этой стружки, существует пропорциональная связь:

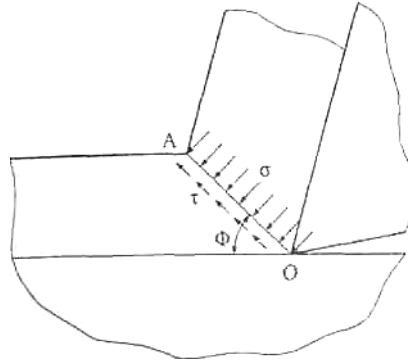


Рис.11. Напряжения в условной плоскости сдвига.

$$\tau_\phi = 0,185 HV$$

через напряжение τ_ϕ можно определить **силу сдвига** F_ϕ :

$$F_\phi = \tau_\phi \frac{ab}{\sin\phi},$$

a и b – толщина и ширина среза соответственно.

Контактные нагрузки на передней поверхности резца исследуются двумя методами: поляризационно-оптическим и разрезного резца.

Метод разрезного резца, предложенный в 1948 г. Д.Т.Васильевым и Е.А.Панкиной основан на использовании специального динамометрического прибора, получившего название разрезного резца. Принцип, устройства такого прибора можно проиллюстрировать рисунком.

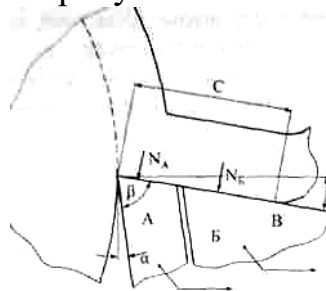


Рис.12. Принципиальная схема динамометрического устройства «разрезной резец»

Главная (точнее, режущая) часть прибора состоит из двух пластин А и Б, разделенных в пределах площадки контакта щелью, ширина которой не превышает 0,01 - 0,02 мм. (Под воздействием сходящей стружки пластины получают независимые друг от друга упругие смещения, которые могут регистрироваться с помощью соответствующих измерителей, протарированных на величину сил, вызывающих смещения. В простейших приборах этого типа регистрируются только тангенциальное (вдоль передней грани), либо только нормальное смещение одной из пластин; в наиболее совершенных – перемещения обеих пластин в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В качестве измерителей в принципе могут быть применены любые средства для точных линейных измерений (например, малогабаритные рычажно-зубчатые головки). Однако наиболее целесообразным оказывается использование для этой цели проволочных или полупроводниковых датчиков, наклеиваемых на упругодеформируемые звенья прибора.)

При неизменном расстоянии l щели от режущей кромки описываемый прибор фиксирует нагрузку на каждом в отдельности из участков площадки контакта, разделенных щелью. Для того, чтобы выяснить закономерность распределения нагрузки по длине контакта, необходимо повторять опыты, меняя каждый раз расстояние l . Это осуществляют либо путем смены пластины А, что довольно трудоемко, либо смещением разрезного резца относительно изделия на необходимое расстояние вдоль режущей кромки. В последнем случае обе пластины делают широкими, а расстояние l - переменным по ширине пластины.

Метод разрезного резца не имеет ограничений в применении, связанных с нагревом инструмента. Его недостатки обусловлены низкой жесткостью части А (из-за малого угла β клиновидного сечения). Жесткость эта резко падает по мере приближения щели к режущей кромке, что препятствует определению контактных напряжений в непосредственной близости от этой кромки. По той же причине метод разрезного резца не пригоден для больших нагрузок: при значительном увеличении нагрузки на пластину Б щель замыкается, вследствие чего нарушается независимость показаний силоизмерителей.

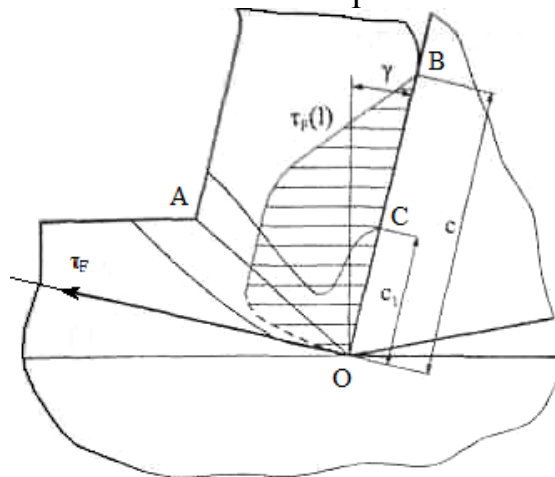


Рис.13. Типичная кривая распределения по длине контакта тангенциальных напряжений $\tau_F(l)$.

Обобщение экспериментальных данных, полученных описанными методами, показало, что характер распределения на контактной поверхности стружки (*и, соответственно, на передней поверхности*) тангенциальных нагрузок (касательных напряжений τ_F) слабо зависит от условий резания и описывается кривой $\tau_F(l)$ приведенной на рис.13. При этом пологая (горизонтальная) ветвь этой кривой соответствует пластическому участку контакта ОС, а ее ниспадающая ветвь - упругому участку СВ. Непосредственно у режущей кромки определить контактное напряжение невозможно ни одним из экспериментальных методов. Поэтому показанное на рис.13 пунктирное продолжение кривой $\tau_F(l)$ сделано условно.

Сумма касательных контактных напряжений τ_F на площадке контакта стружки с резцом называется **силой трения** на передней поверхности. Эта сила равна:

$$F = \int_0^c b_1 \tau_F(l) dl.$$

Если отнести силы N и F к площади контакта, то мы найдем удельные контактные нагрузки на передней поверхности резца:

$$q_N = \frac{N}{b_1 c};$$

$$q_F = \frac{F}{b_1 c}.$$

Первая из этих величин q_N называется **средним контактным давлением**, вторая q_F – **удельной силой трения**.

Отношение силы трения F к нормальной силе N называется **средним коэффициентом трения** стружки о резец (коэффициентом трения на передней поверхности):

$$\mu = \frac{F}{N},$$

а соответствующий ему угол - **углом трения**:

$$\eta = \arctg \mu$$

Средний коэффициент трения μ является важнейшим параметром процесса стружкообразования.

Характер контактного взаимодействия между инструментом и пластически деформируемой заготовкой иной, чем между поверхностями деталей машины в обычных парах трения, и поэтому коэффициент трения в данном случае не может рассматриваться как некоторый коэффициент пропорциональности в формуле $F = \mu N$, определяющий силу трения при заданной нормальной силе. *Его физический смысл более сложен*. Параметр μ не является коэффициентом трения в обычном понимании. Это всего лишь усредненная характеристика напряженного состояния в зоне контакта стружки с инструментом.

Перемещение стружки по передней поверхности сопровождается рядом физических процессов на ее контактной поверхности и в прилегающем к ней тонком контактном слое. В их числе

- 1) адгезионное схватывание выступов (неровностей) контактной поверхности стружки с передней поверхностью инструмента, приводящее к образованию «мостиков сварки» и их разрушению при дальнейшем продвижении стружки;
- 2) пластическое деформирование (сглаживание) указанных неровностей под воздействием контактных напряжений, приводящее к увеличению фактической площади контакта;
- 3) пластическое деформирование слоя стружки, прилегающего к ее контактной поверхности, как правило, сопровождающееся его упрочнением;
- 4) постепенное проникновение в контактное пространство частиц из окружающей среды, ограничивающих непосредственный контакт поверхностей стружки инструмента и тем самым способствующих превращению сухого трения в граничное.

Контактные нагрузки на задней поверхности.

Как уже говорилось, перед движущимся инструментом распространяется (катится) волна упругой деформации из-за чего после прохождения резца поверхность резания поднимается, *поскольку снимается нагрузка и происходит упругое восстановление обрабатываемого материала*. Кроме того, идеально

острого резца не существует. Всегда имеется переход от передней поверхности к задней через радиус скругления, обычно он составляет 0,005 – 0,02 мм.

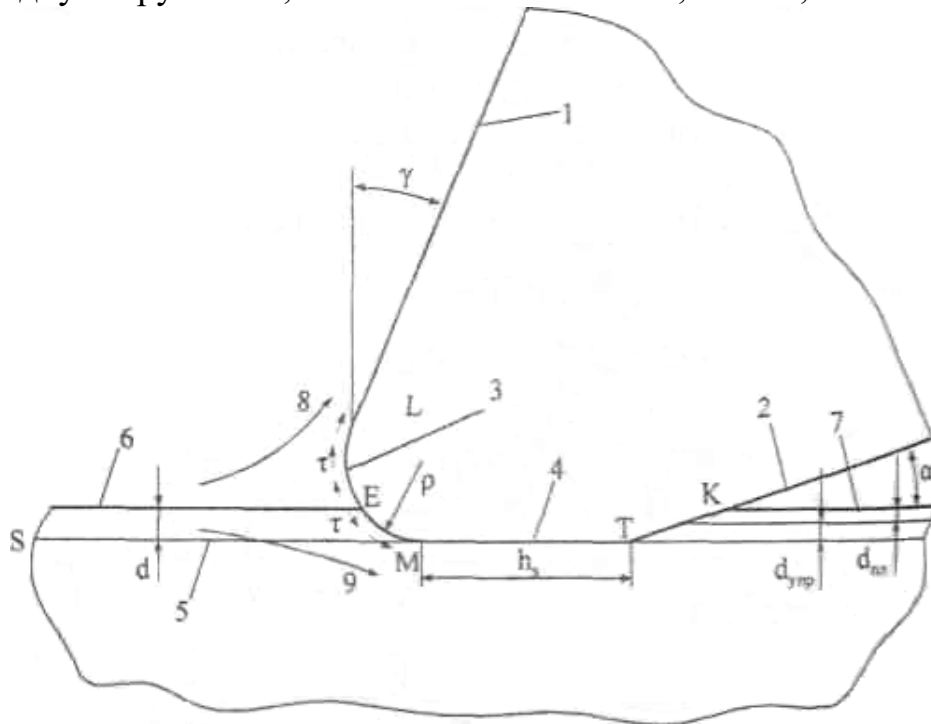


Рис.14. Схема взаимодействия реального лезвия с материалом заготовки в процессе резания: 1 - передняя поверхность; 2 - задняя поверхность; 3 - криволинейная переходная поверхность, сформированная при заточке лезвия; 4 — поверхность ленточки износа по задней поверхности; 5 - номинальная поверхность среза; 6 - фактическая поверхность среза; 7 - поверхность резания, 8, 9 - линии тока деформируемого материала (на переднюю и под заднюю поверхность, соответственно); ρ - радиус округления режущей кромки; d - толщина слоя, подминаемого под заднюю поверхность; $d_{упр}$ - деформация упругого восстановления поверхности резания; $d_{пл}$ - пластическое поднятие поверхности резания, обусловленное перетоком материала под задней поверхностью.

Из сказанного можно сделать ряд выводов:

1. Передняя и задняя поверхности лезвия сопрягаются плавно, и режущая кромка в геометрическом понимании (как линия пересечения этих поверхностей) у реального лезвия отсутствует.
2. Наплывающий на лезвие материал заготовки в точке E делится на два потока, из которых один (верхний на рис.14) вступает на переднюю поверхность, а второй (нижний) толщиной d подминается под заднюю поверхность. Поэтому реальная поверхность среза OE проходит именно через точку E и не совпадает с номинальной поверхностью среза SM.
3. Материал, подминаемый под заднюю поверхность, претерпевает при этом значительную деформацию, что создает на поверхности резания тонкий сильно деформированный слой толщиной $d_{пл}$.
4. Материал, уходящий на переднюю поверхность, некоторую часть своего пути проходит по криволинейному участку EL, что создает дополнительную деформацию в контактном слое стружки из-за уменьшенных значений переднего угла на этом участке. Такое локальное воздействие деформационных процессов, происходящих в окрестности режущей кромки,

на деформацию стружки становится заметным лишь при очень малых толщинах среза, сравнимых с величиной радиуса ρ . В остальных случаях им можно пренебрегать.

5. В точке E разделения потоков материала тангенциальное контактное напряжение теоретически должно быть равно нулю:

$$(\tau_F)_E = 0$$

По мере удаления от точки E в сторону как задней, так и передней поверхности, напряжение τ_F быстро растет по модулю, сохраняя противоположные знаки. Поэтому, если двигаться к точке E со стороны передней поверхности, тангенциальная нагрузка будет уменьшаться до нуля. Именно это очевидное обстоятельство отражает экстраполяция на начало координат кривой $\tau_F(l)$ (рис. 13, пунктир).

Как следует из рисунка 14 направление нормали к контактной площадке не одинаково на различных участках задней поверхности (МТ, ТК), а на криволинейном участке ЕМ переменено по дуге контакта. По этой причине и равнодействующие нормальной силы и силы трения на этих участках имеют разное направление. Обозначим равнодействующие R_p – криволинейный участок ЕМ; R_h – линейный участок МТ; R_α – линейный участок ТК. Раскладывая равнодействующие на оси Y и Z статической системы координат и суммируя их компоненты по этим осям, получим для нормальной компоненты

$$N_p + N_h + N_\alpha = N_1$$

и для тангенциальной компоненты

$$F_p + F_h + F_\alpha = F_1$$

Силы N_1 и F_1 называются **нормальной силой** и **силой трения** на задней поверхности. Сумма этих сил даст нам общую равнодействующую R_1 .

Поскольку силы на задней поверхности R_1 , N_1 , F_1 являются результатом локальных деформационных процессов, происходящих в окрестности режущей кромки, то они практически не зависят от толщины среза. По величине они значительно меньше сил R , N , F , действующих на передней поверхности, которые изменяются почти пропорционально толщине среза. Поэтому при оценке нагрузки на инструмент в условиях черновой и получистовой обработки силами на задней поверхности можно пренебречь. При чистовой и финишной обработке, характеризующихся малыми толщинами среза, этого делать уже нельзя, т.к. в этом случае доля сил N_1 , F_1 в общих силах, действующих в процессе резания, становится существенной. Точно также нельзя не учитывать силы на задней поверхности при работе изношенным инструментом, когда радиус округления ρ и ширина h_3 ленточки износа сильно увеличены.

Таким образом, на лезвие инструмента действуют две системы сил: силы R , N , F на передней поверхности и силы R_1 , N_1 , F_1 на задней поверхности. И те и другие являются компонентами общей силы R , действующей на инструмент. Поскольку они непосредственно связаны с физическими процессами, происходящими в зоне резания, их называют **физическими составляющими** силы резания R .

Из сказанного выше также следует, что составляющие R и R_1 приложены к инструменту в различных точках контура его контакта с изделием и стружкой. Точка приложения силы R должна находиться где-то между этими точками.

Однако, если для анализа распределения контактных напряжений очень важно знать точку приложения каждой составляющей силы, то для общей оценки воздействия отдельных составляющих на инструмент, станок, изделие, а также для установления связей между ними, в этом нет необходимости, так как контактные площадки весьма малы по сравнению с размерами даже лезвия инструмента. Поэтому в дальнейшем для упрощения, когда распределение контактных напряжений нас не интересует, будем считать все составляющие силы резания, приложенными на режущей кромке инструмента.

Таким образом, приложив результирующие сил передней и задней поверхностей на главной режущей кромке, определим полную силу резания P равной геометрической сумме сил на передней и задней поверхностях:

$$P = R + R_1.$$

Непосредственное технологическое значение имеют составляющие силы P , связанные с технологическими параметрами процесса резания.

В случае прямоугольного свободного строгания ими будут проекции силы P , направленные по осям статической системы координат Z и Y . Обозначая их через P_Z и P_Y имеем:

$$P = P_Z + P_Y.$$

Составляющие P_Y и P_Z силы резания в дальнейшем будем называть ее **технологическими** составляющими. Аналитические соотношения между технологическими и физическими составляющими силы резания выразятся следующими соотношениями:

$$P_Z = R_Z + N_1 = N \cos \gamma + F \sin \gamma + F_1, \quad (6)$$

$$P_Y = R_Y + N_1 = F \cos \gamma - N \sin \gamma + N_1, \quad (7)$$

Однако на практике для определения силы резания часто пользуются следующей экспериментальной формулой:

$$P_z = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot K \quad [\text{Кг}],$$

где C_p – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и условия обработки;

t – глубина резания в мм;

s – подача в мм/об;

K – общий поправочный коэффициент, учитывающий конкретные условия обработки. Вычисляется как произведение ряда коэффициентов, зависящих от материала инструмента и заготовки, от твердости обрабатываемого материала и т.д.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

При непрерывном процессе, каким является процесс резания и стружкообразования, мерой энергоемкости служит работа, произведенная в единицу времени, то есть мощность N_e (*индекс «e» означает, что речь идет об эффективной мощности, затрачиваемой непосредственно на процесс резания, а не о мощности, потребляемой двигателем станка из электрической сети*).

В случае свободного строгания мощность N_e полностью определяется мощностью главного движения резания и согласно известной формуле равна произведению силы (в данном случае составляющей P_z) на скорость резания:

$$N_e = P_z V.$$

Поскольку физически процесс резания сводится к деформированию и удалению некоторого объема материала, то важной характеристикой этого процесса являются энергетические затраты на удаление единицы объема обрабатываемого материала. Этот энергетический показатель называется **удельной работой резания** A_w и выражается формулой:

$$A_w = \frac{N_e}{W} \quad (8)$$

где W – объем материала, удаляемый инструментом в единицу времени. Подставляя в формулу (8) выражение для объема, получим:

$$A_w = \frac{P_z}{ab} \quad (9)$$

Мы уже говорили, что на упругую деформацию и на образование новых поверхностей затрачивается так мало энергии, что при расчетах ими можно пренебречь. Поэтому по каналам потребления энергии удельную работу резания можно разделить на три физические составляющие:

1) удельная работа $A_{w\phi}$, затрачиваемая на пластическое деформирование материала в основной пластической области;

2) удельная работа A_{wy} , затрачиваемая на трение стружки о переднюю поверхность и связанное с ним дополнительное деформирование контактного слоя стружки;

3) удельная работа A_{wl} , затрачиваемая на локальные процессы трения и деформирования в зоне контакта задней поверхности.

Для вычисления названных составляющих удельной работы резания воспользуемся формулой (9), внося в нее значение P_z из первой части равенства (6):

$$A_w = \frac{R_z + F_1}{ab} = \frac{R_z}{ab} + \frac{F_1}{ab}. \quad (10)$$

Первое слагаемое в правой части равенства (10) связано с основными процессами формирования стружки. Назовем его **удельной работой стружкообразования**:

$$A'_w = \frac{R_z}{ab}.$$

Физический смысл параметра A'_w – усредненные по толщине стружки удельные энергетические затраты на ее формирование.

Второе слагаемое в правой части формулы (10) представляет удельную работу сил на задней поверхности, условно отнесенную к единице объема

материала удаляемого слоя:

$$A_{w1} = \frac{F_1}{ab}$$

Удельная работа стружкообразования A'_w , в свою очередь, состоит из двух физических составляющих: удельной работы деформации $A_{w\Phi}$ и удельной работы трения стружки о переднюю поверхность A_{wy} .

Для схемы стружкообразования с единственной плоскостью сдвига удельной работы деформации определяется как произведение силы сдвига F_Φ на скорость сдвига V_Φ , отнесенное к единице объема удаляемого материала. Через среднее касательное напряжение выражение для $A_{w\Phi}$ запишется следующим образом:

$$A_{w\Phi} = \frac{\tau_\Phi \text{Cos} \gamma}{\text{Sin} \Phi \text{Cos}(\Phi - \gamma)}$$

или

$$A_{w\Phi} = \tau_\Phi \cdot g, \quad (11)$$

где τ_Φ – среднее касательное напряжение в условной плоскости сдвига;

g – относительный сдвиг, характеризующий конечную деформацию в стружке.

Напомним, что выражение (11) получено для схемы с единственной плоскостью сдвига, предполагающей, что вся пластическая деформация сосредоточена в указанной плоскости и поэтому каждый элементарный деформируемый объем при пересечении плоскости сдвига мгновенно получает конечную деформацию, равную g . В действительности, поскольку пластическая область имеет конечную толщину, нарастание деформации элементарного объема происходит постепенно, а сопровождающий его рост напряжения определяется кривой течения, подобной изображенной на рис.10. Удельная работа, определяемая формулой (11) будет больше фактически затрачиваемой. Эта ошибка является прямым следствием несовершенства схемы стружкообразования с единственной плоскостью сдвига.

Идя тем же путем, что и при вычислении $A_{w\Phi}$, нетрудно определить для схемы с единственной плоскостью сдвига и удельную работу трения A_{wy} :

$$A_{wy} = \frac{F \cdot V_\gamma}{abv} = \frac{F}{ab} \cdot \frac{\text{Sin} \Phi}{\text{Cos}(\Phi - \gamma)},$$

где F – сила трения на передней поверхности;

V_γ – скорость перемещения стружки.

Или через коэффициент уширения и удельную силу трения на передней поверхности:

$$A_{wy} = K_b \frac{c}{a} q_F \cdot \frac{\text{Sin} \Phi}{\text{Cos}(\Phi - \gamma)},$$

где q_F – удельную силу трения;

c – полная длина контакта стружки с резцом;

K_b – коэффициент уширения.

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

Нагрев обрабатываемого изделия и инструмента в процессе резания вызывает их термические деформации, которые влияют на точность обработки, а так же на уровень технологических остаточных напряжений в изделии. Температура в зоне резания существенно влияет на характеристики процесса стружкообразования.

Уровень температур на различных участках зоны резания зависит от:

1. местоположения в зоне резания источников тепла, их формы и интенсивности тепловыделения;
2. закономерностей распространения тепла в зоне резания и за ее пределами, которые, в свою очередь зависят от условий теплообмена между заготовкой, инструментом и образующейся стружкой.

Тепловой процесс в зоне резания может быть установившемся (стационарным) или не установившемся (нестационарным) во времени. В общем случае **не установившегося** теплового процесса его параметры являются функциями времени. *(при резании не установившиеся Тепловые процессы имеют место при врезании, при точении с переменной глубиной, при поперечной обточке).*

При точении с постоянными параметрами V , S и t в условиях сливного стружкообразования тепловые характеристики стабилизируются во времени после начала процесса очень быстро. Это позволяет рассматривать тепловые процессы, сопровождающие сливное стружкообразование, как **установившиеся**.

Тепловые источники в зоне резания

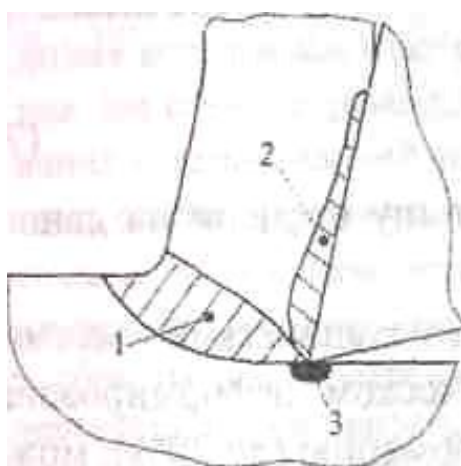


Рис. 15. Тепловые источники в зоне резания

Так как трение при резании, в свою очередь, сопряжено с глубокими пластическими деформациями в контактных слоях, то отделить тепло, обусловленное только трением, от тепла, связанного только с деформацией в контактом слое, не представляется возможным. Принято дифференцировать образующееся при резании тепло не по причинам его возникновения, а по месту его выделения. По этому признаку различают три очага тепловыделения (три тепловых источника) в зоне резания:

- 1) в зоне основной деформации;
- 2) в зоне трения на передней поверхности;
- 3) в зоне трения на задней поверхности.

(Теплофизика классифицирует тепловые источники по целому ряду признаков: по форме пространства, занимаемого источником (трехмерные, двухмерные, одномерные, точечные); по распределению интенсивности тепловыделения внутри источника (однородные, неоднородные); по

продолжительности их действия (мгновенные, периодические, непрерывно действующие), а также по некоторым другим признакам (например, неподвижные или движущиеся).)

Поскольку напряженно-деформированное состояние в различных точках областей 1, 2, 3 неодинаково, то и совершаемая механическая работа, а значит, и количество выделяющегося тепла в этих точках тоже будет неодинаковым. Поэтому в соответствии с вышеприведенной классификацией все три тепловых источника в зоне резания - трехмерные неоднородные источники.

Что касается продолжительности действия источников, то при постоянстве режимов резания она зависит главным образом от характера стружкообразования (сливное, элементное). При стабильном - сливном стружкообразовании все три тепловых источника можно рассматривать как непрерывно действующие.

Тепловые источники в зоне резания при движении инструмента относительно заготовки движутся вместе с ним. Поэтому в системе координат Y, Z , связанной с инструментом, их следует рассматривать как неподвижные. В системе координат Y_1, Z_1 , связанной с заготовкой (или со стружкой), те же источники должны быть рассматриваемы как движущиеся.

Количество тепла, выделяемого в единицу времени, то есть тепловая мощность Q_i каждого из источников тепла, определяется механической мощностью, потребляемой при деформации (и трении) в пределах соответствующего участка зоны резания. В том случае, если в процессе резания механическая энергия полностью превращается в тепловую, последняя для каждого очага тепловыделения может быть подсчитана по простому соотношению:

$$Q_i = N_i \quad (12)$$

где N_i – механическая работа, совершаемая в единицу времени на данном участке, то есть мощность деформирования и трения.

(Это выражение предполагает полный переход механической энергии в тепловую. Между тем известно, что при пластическом деформировании часть механической энергии, затрачиваемой на деформацию (до 20%), может переходить в потенциальную энергию кристаллической решетки. Чтобы выяснить, насколько это справедливо для случая резания, специальные опыты были поставлены в 40-х гг. XX в. Г.И.Епифановым и П.А.Ребиндером (СССР), а также В.А.Шмидтом, О.В.Бостоном и В.В.Джилбертом (США).

Результаты, полученные обеими группами ученых при сверлении различных металлов (сталей, медных и цинковых сплавов), показали, что при резании не менее 99% механической энергии переходит в тепловую. Доля скрытой энергии кристаллической решетки составляет, следовательно, не более одного процента, то есть эта величина того же порядка, что и неизбежные погрешности опыта. Объясняется это, по-видимому, чрезвычайно высокими значениями деформаций при резании.)

Таким образом, есть основания считать, что в процессе резания практически вся затраченная механическая энергия превращается в тепловую. Это дает возможность использовать формулу (12) для определения тепловой мощности, выделяющейся в очагах 1, 2, 3, по известной величине совершаемой в каждом из них механической работы.

Сложность формы и не однородность тепловых источников в зоне резания делает оценку их тепловой мощности очень сложной задачей. Задача эта существенно упрощается (за счет потери точности оценки) при переходе к эквивалентной схеме стружкообразования с единственной плоскостью сдвига. Тогда согласно логике этой схемы источники 1, 2, 3 из трехмерных превращаются в двумерные – плоские.

Тепловые мощности Q_{Φ} , Q_{γ} , Q_1 являются составляющими общей тепловой мощности Q . С учетом сказанного выше они могут быть приравнены к величинам механической мощности, потребляемой в каждой из соответствующих областей зоны резания и могут быть вычислены по следующим формулам:

$$Q_{\Phi} = \tau_{\Phi} \cdot gabv;$$

$$Q_{\gamma} = \frac{FS \sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} v;$$

$$Q_1 = F_1 v.$$

Пути распространения тепла и теплообмен в зоне резания

В зоне резания в теплообмене участвуют три тела: заготовка (изделие) инструмент (резец), стружка и тепло, генерируемое источниками 1, 2, 3 распределяется между этими телами (рис. 15). Кроме того, часть выделяющегося тепла. При установившемся тепловом процессе в зоне резания сохраняется равновесие между генерируемым (приходящим) и потребляемым (уходящим) теплом – **тепловой баланс**. Пренебрегая теплом, выделяющемся при упругой деформации, запишем уравнение теплового баланса в зоне резания в следующем виде:

$$Q_{\Phi} + Q_{\gamma} + Q_1 = Q_{и} + Q_{р} + Q_{с} + Q_{ср.д.}$$

где $Q_{и}$, $Q_{р}$, $Q_{с}$, $Q_{ср.д.}$ – доля тепла, переходящая в изделие, резец, стружку и окружающую среду, соответственно.

Теплообмен твердого тела с окружающей (газообразной или жидкостной) средой осуществляется двумя способами: радиационным и конвективным.

При **радиационном** способе распространение тепловой энергии осуществляется излучением, которое при резании происходит в инфракрасной части спектра. Интенсивность этого излучения определяется главным образом тремя параметрами:

- 1) площадью излучающей поверхности;
- 2) степенью черноты этой поверхности;
- 3) температурой излучающей поверхности.

Общая площадь нагретых участков открытых поверхностей тел, участвующих в теплообмене при резании, очень невелика. Как показывает элементарный расчет, она такова, что при температурах, характерных для процесса резания, потерями тепла за счет радиации в окружающую среду можно пренебречь.

При **конвективном** способе теплообмена с окружающей средой он осуществляется путем отбора тепла от нагретой поверхности тела движущимися потоками жидкости или газа. Если специальные средства охлаждения зоны резания не применяются, то конвекционный отбор тепла происходит за счет рабочих движений заготовки (или инструмента), обеспечивающих естественную конвекцию («резание в воздухе»). Доля тепла, уходящего в среду при резании в воздухе столь же мала, как и потеря тепла за счет излучения и на тепловой баланс сколько-нибудь заметно не влияет.

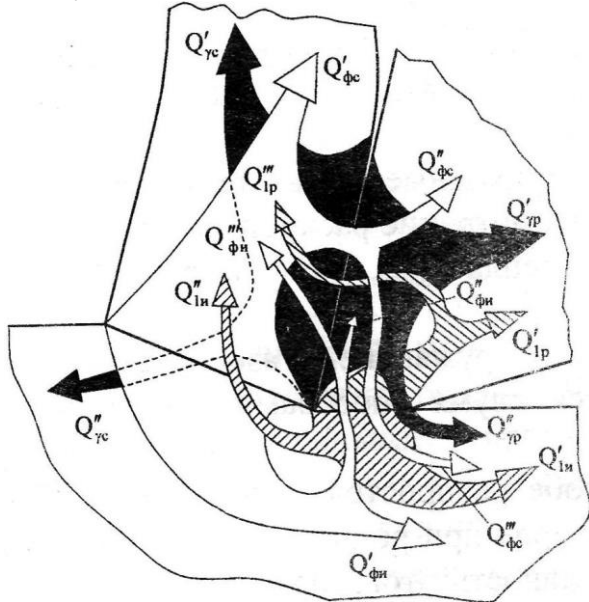


Рис. 16. Основные и возможные тепловые потоки в зоне резания:
 $Q'_{фс}, Q'_{фи}, Q'_{рр}, Q'_{рс}, Q'_{1р}, Q'_{1и}$ – основные;
 $Q''_{фс}, Q''_{фи}, Q''_{рр}, Q''_{рс}$ и др. – принципиально возможные

теплообмене (изделии, резце и стружке) а также переход тела от одного из них к другому через площадки непосредственного контакта осуществляются за счет **теплопроводности** передачи тепла от более нагретых участков к менее нагретым. Принципиально возможные потоки и перетоки тепла за счет теплопроводности в зоне резания применительно к принятым схемам расположения и форме тепловых источников (Рис. 15) представлены на рис. 16.

Мощности основных тепловых потоков в зоне резания, как и существование тех или иных перетоков тепла, зависит от большого числа факторов: свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрических параметров лезвия, режима обработки и др. В зависимости от указанных факторов формируются температурные поля в изделии (заготовке), стружке и резце (инструменте), которые, собственно, и определяют пути распространения тепла.

В случае свободного прямоугольного строгания задачу о распределении температур в зоне резания можно решать как двумерную (как это выше было сделано для задачи о напряженно-деформированном состоянии). Каждое из сформированных температурных полей в данном случае представляет собой семейство плоских кривых - линий постоянных температур, называемых

При охлаждении зоны резания специальными смазочно-охлаждающими средствами (жидкими или газообразными) доля тепла, уходящего в окружающую среду возрастает. Она зависит от свойств охлаждающей субстанции и способа ее подачи в зону резания, доходя в отдельных случаях до 10-15% от количества генерируемого в зоне резания тепла. (Случай обработки резанием с применением смазочно-охлаждающих средств следует рассматривать отдельно.)

Проанализируем распространение тепла в зоне резания при стружкообразовании в воздушной среде, когда теплообменом с окружающей средой можно пренебречь.

Распространение тепла внутри каждого из твердых тел, участвующих в

каждого из твердых тел, участвующих в теплообмене (изделии, резце и стружке) а также переход тела от одного из них к другому через площадки непосредственного контакта осуществляются за счет теплопроводности передачи тепла от более нагретых участков к менее нагретым.

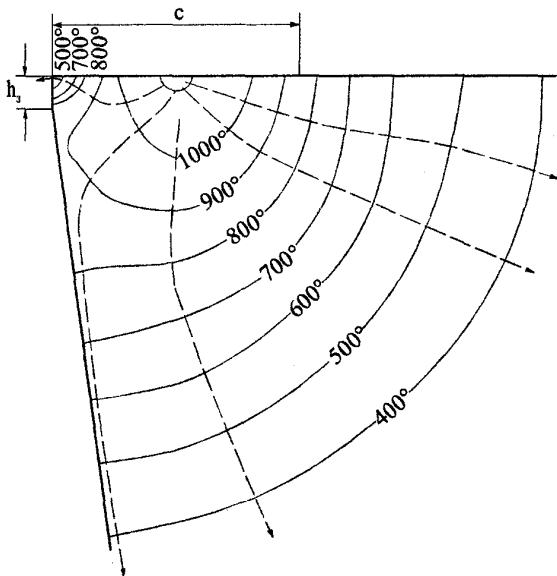


Рис. 17. Температурное поле и лезвие инструмента, рассчитанное Резниковым А.Н. для случая: обрабатываемый материал - титановый сплав BT2, инструментальный материал - BK8, $\gamma=0$, $v=40$ м/мин, $b=2,8$ мм, $a=0,14$ мм/об, длина контакта по передней поверхности $c=0,71$ мм, ширина ленточки по задней поверхности $h_3=0,1$ мм

Согласно основному закону теплопроводности (закону Био-Фурье) количество тепла q , протекающее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности в направлении нормали n к последней, и называемое интенсивностью (плотностью) теплового потока, прямо пропорционально градиенту температуры, то есть:

$$q = -\lambda \text{grad}\theta = -\lambda l_n \frac{d\theta}{dn} = -\lambda \nabla\theta, \quad (13)$$

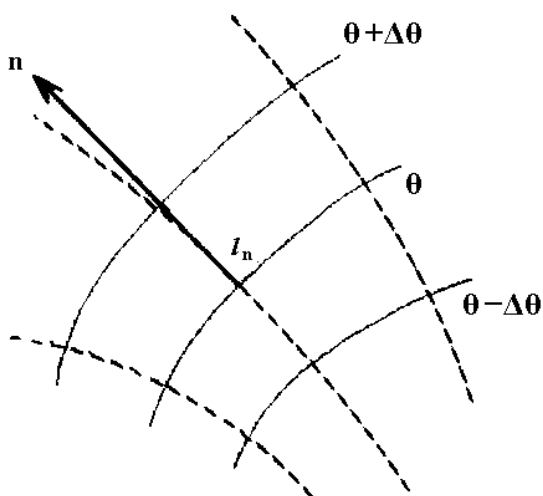


Рис. 18. Температурный градиент в ячейке температурного поля

изотермами. Типичное семейство изотерм в лезвии инструмента приведено на рис.17.

Оставаясь постоянной вдоль изотермы, температура изменяется в любом другом направлении, причем наибольший перепад температуры на единице длины имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности (или линии для плоской задачи). Закономерность возрастания температуры вдоль нормали характеризуется **градиентом температуры** ($\text{grad } \theta$). Градиент температуры - это векторная величина, равная:

$$\text{grad}\theta = l_n \frac{d\theta}{dn},$$

где l_n - вектор единичной длины, направленный по нормали n в сторону возрастания температуры (рис.18), $d\theta/dn$ производная температуры по длине нормали к изотермической поверхности.

где λ - коэффициент пропорциональности, называемый **коэффициентом теплопроводности**, а знак минус в правой части указывает, что тепло распространяется в сторону понижения температуры.

Количество тепла Q , проходящего в единицу времени через изотермическую поверхность конечных размеров, то есть мощность теплового потока определяется площадью S этой поверхности и интенсивностью q теплового потока в каждой ее точке. В общем случае эта величина выражается интегралом:

$$Q = \int_S q dS = -\lambda \int_S \frac{d\theta}{dn} dS. \quad (14)$$

Из выражений (13) и (14) следует, что как интенсивность, так и мощность теплового потока изменяются пропорционально коэффициенту теплопроводности. Этот коэффициент является физической характеристикой тепла в отношении его теплопроводности и для разных веществ изменяется в широких пределах. Коэффициент теплопроводности зависит от химического состава, физического строения и состояния вещества. Зависит он также от температуры: для многих металлов с ее повышением этот коэффициент уменьшается по линейному закону. Чем ниже коэффициент теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, тем меньше мощность тепловых потоков, направленных в заготовку и инструмент, тем в большей степени тепло локализуется в зоне резания, в окрестностях источников его образования. Поэтому процесс резания материалов с низкими коэффициентами теплопроводности (например, жаропрочных и титановых сплавов) характеризуется высокими значениями температур на контактных поверхностях инструмента, что ускоряет его износ и разрушение и является одной из причин низкой производительности при обработке резанием деталей из таких материалов.

Температурное поле, изотермы которого сохраняют свое расположение во времени, называется **стационарным**. При стабильном сливном стружкообразовании после достижения в зоне резания теплового баланса (и, следовательно, установившегося процесса) стационарное температурное поле формируется в лезвии инструмента, так как все три тепловых источника в зоне резания не меняют своего расположения относительно инструмента.

В системе координат Y_1, Z_1 , связанной с заготовкой (изделием), все тепловые источники - движущиеся. Поэтому температурное поле заготовки - нестационарное. Однако в системе координат Y, Z , связанной с инструментом, а следовательно, и с тепловыми источниками, это поле - стационарное. Такое температурное поле, стационарное в системе координат, связанной с источниками тепла, и нестационарное в системе координат, связанной с нагреваемым телом, называется **квазистационарным**. Подобное квазистационарное температурное поле создается и в стружке, которая движется относительно инструмента (и всех трех тепловых источников).

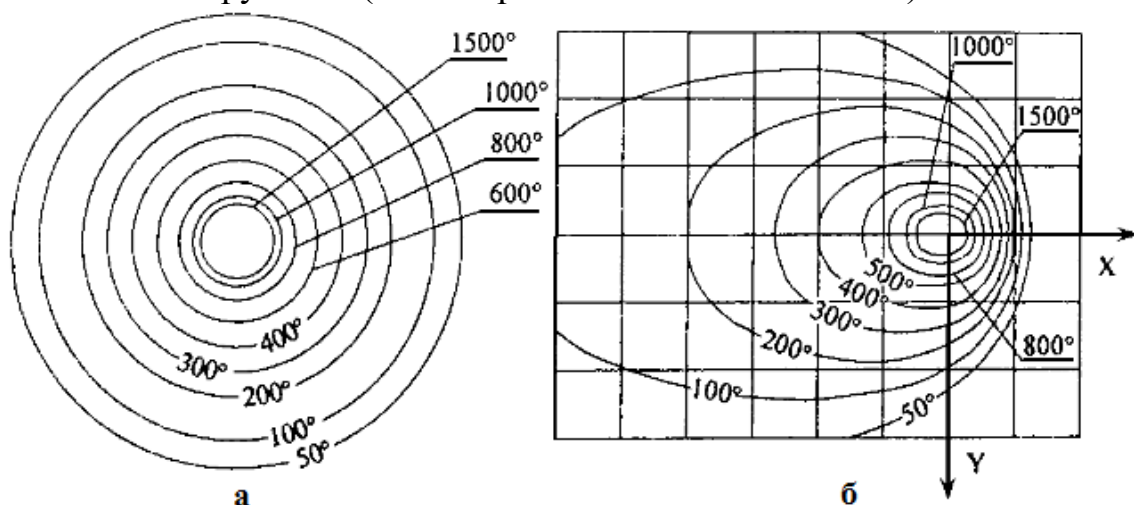


Рис. 19. Температурное поле, создаваемое непрерывно действующим точечным тепловым источником в изотропном не ограниченном теле: а – при неподвижном источнике; б – при движущемся источнике.

Конфигурация температурного поля, создаваемого движущимся тепловым источником, зависит от скорости его движения. Поясним эту зависимость на простейшем примере. Рассмотрим температурное поле, создаваемое точечным источником в неограниченном изотропном теле. Если источник неподвижен, то это поле в любом проходящем через источник плоском сечении изобразится системой концентрических окружностей (рис.19,а). При непрерывно действующем источнике постоянной мощности температурное поле будет стационарным и образующие его изотермы - неподвижными. При изменении мощности источника изотермы станут перемещаться: от центра при увеличении мощности (температурное поле расширяется) и к центру при ее уменьшении (температурное поле сжимается). В обоих случаях скорость v_θ перемещения конкретной изотермы ($\theta = \theta_i = \text{const}$), назовем ее скоростью распространения температурного поля, - будет тем больше, чем выше коэффициент теплопроводности тела и чем меньше его теплоемкость. Аналитически эта зависимость может быть представлена в виде:

$$V_\theta = -\frac{\lambda}{c_{уд.}} \cdot \frac{\nabla^2 \theta}{\nabla \theta} = -\omega \frac{\nabla^2 \theta}{\nabla \theta},$$

где λ – коэффициент теплопроводности;
 $c_{уд.}$ – удельная массовая теплоемкость;
 $\nabla \theta$ – градиент температуры,

$$\nabla^2 \theta = \frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{d^2 \theta}{dy^2} + \frac{d^2 \theta}{dz^2}$$

- функция, характеризующая трехмерное температурное поле.

Коэффициент $\omega = \lambda/c_{уд.}$, пропорциональный скорости v_θ распространения температурного поля, называется **коэффициентом температуропроводности** и является важной теплофизической характеристикой материала.

Все сказанное выше относится к неподвижному источнику. Рассмотрим теперь движущийся точечный тепловой источник постоянной мощности. Конфигурация создаваемого им температурного поля будет зависеть от соотношения между скоростью v перемещения источника и скоростью v_θ распространения температурного поля. В том случае, когда первая из них меньше или равна второй ($v \leq v_\theta$), изотермы остаются окружностями, и температурное поле перемещается вместе с источником тепла, не меняясь. В противоположном случае, то есть, когда скорость движения источника превышает скорость распространения температурного поля ($v > v_\theta$), последнее трансформируется (рис.19, б), и тем в большей степени, чем выше скорость движения источника. При достаточно высоких значениях этой скорости изотермы, находящиеся перед источником (по ходу его движения), тесно сближаются, почти сливаясь друг с другом. Поэтому при таких скоростях движения источника опережающую его тепловую волну можно не принимать во внимание, что упрощает тепловые расчеты в подобных ситуациях. Заметим, что тепловые источники, движущиеся с такими скоростями, называются **быстродвижущимися**.

Сказанное полностью относится к квазистационарным температурным полям в заготовке, создаваемым тепловыми источниками Q_ϕ и Q_1 в заготовке.

При низких скоростях резания эти поля распространяются далеко вглубь заготовки. При высоких скоростях резания те же поля сжимаются, приближаясь к источникам.

Для исследования процесса резания калориметрический метод впервые был применен Н.Н. Саввиным (Россия, 1908г.), а позже Я.Г. Усачевым (Россия, 1914 г.), О.В. Бостоном (США, 1936г.) и др. На рис. 20 приведена схема экспериментальной установки для изучения калориметрическим методом закономерности распределения генерируемого в зоне резания тепла между телами, участвующими в теплообмене: изделием, стружкой и резцом. Непосредственному экспериментальному определению подлежат тепло Q_c уходящее со стружкой, и тепло Q_p , переходящее в резец. Общее количество тепла, генерируемого в зоне резания, находили через механическую мощность в соответствии с формулой (12), а количество тепла, переходящего в изделие, определялось из уравнения теплового баланса простым вычитанием.

Методы экспериментального исследования тепловых потоков и температур в зоне резания

Исследования тепловых процессов в зоне резания является не менее сложной задачей, чем исследование происходящих в ней деформационных процессов. Проводятся они как экспериментальными, так и теоретическими (расчетными) способами.

При экспериментальном изучении тепловых процессов в твердых телах объектами исследования в зависимости от поставленной задачи могут становиться тепловые потоки (их мощности, плотность), температуры (локальные, средние), температурные поля.

Основной экспериментальный метод, применяемый для непосредственного исследования тепловых потоков - **калориметрический**. Как следует из названия, а нем используется **калориметр** – прибор, известный из курса общей физики и предназначенный для определения количества тепла, содержащегося в теле.

Для исследования процесса резания калориметрический метод впервые был применен Н.Н. Саввиным (Россия, 1908г.), а позже Я.Г. Усачевым (Россия, 1914 г.), О.В. Бостоном (США, 1936г.) и др. На рис. 20 приведена схема экспериментальной установки для изучения калориметрическим методом закономерности распределения генерируемого в зоне резания тепла между телами, участвующими в теплообмене: изделием, стружкой и резцом. Непосредственному экспериментальному определению подлежат тепло Q_c уходящее со стружкой, и тепло Q_p , переходящее в резец. Общее количество тепла, генерируемого в зоне резания, находили через механическую мощность в соответствии с формулой (12), а количество тепла, переходящего в изделие, определялось из уравнения теплового баланса простым вычитанием.

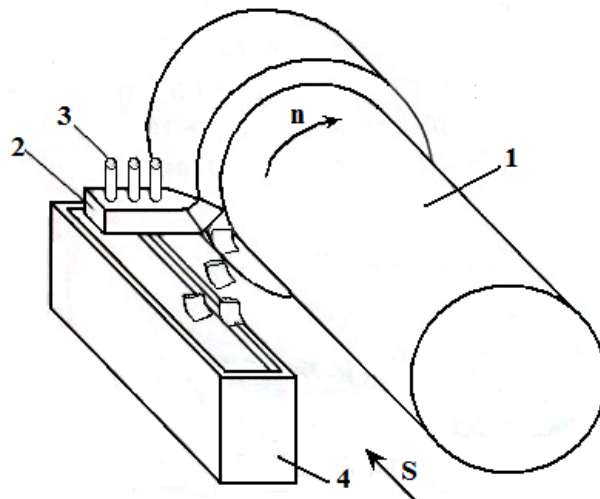


Рис. 20. Схема экспериментальной установки для исследования распределения тепла, выделяющегося при точении, между заготовкой, резцом и стружкой: 1 – заготовка; 2 – резец-калориметр; 3 – термометры; 4 – калориметр для сбора стружки (опыты С.С. Можяева)

В установке (рис. 20) наиболее просто был решен вопрос с определением теплосодержания стружки: резец ставили на суппорт в перевернутом положении и резание производилось при обратном вращении шпинделя. Стружка при этом свободно падала в установленный на суппорте калориметр. По показаниям трех термометров определялись градиенты температур, что позволяло рассчитать мощность теплового потока, проходящего в резец.

Результаты проведенного исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Относительное количество тепла, уходящего в резец, составляет несколько процентов от общего количества тепла, выделившегося в зоне резания. С повышением скорости резания эта доля тепла быстро уменьшается. Заметим, что речь идет именно об относительном (процентном) уменьшении доли тепла, переходящего в инструмент.

2. Доля тепла, переходящего и изделие (заготовку), почти стопроцентная при очень низких скоростях, с повышением скорости резания очень быстро уменьшается. С повышением скорости резания квазистационарное температурное поле в заготовке сжимается, и, как следствие, вес большая часть тепла задерживается в пределах срезаемого слоя и вместе с ним уходит в стружку. Отток тепла в заготовку уменьшается.

3. Теплосодержание стружки с повышением скорости резания быстро возрастает. Это происходит потому, что стружка питается от двух тепловых источников: Q_{ϕ} и Q_{γ} . Ранее отмечалось, что с ростом скорости резания энергия Q_{ϕ} генерируемая первым источником, перераспределяется в пользу стружки. Подобное перераспределение происходит и с энергией Q_{γ} , генерируемой вторым из названных источников, из-за сокращения той части Q_{γ} которая уходит в инструмент.

Отметим, что описанный феномен перераспределения образующегося тепла между заготовкой и стружкой с изменением скорости резания хорошо известен каждому токарю: при низких скоростях заготовка сильно нагревается, а

стружка остается лишь теплой. При высоких скоростях резания, наоборот: заготовка – холодная, стружка – горячая.

С помощью калориметрического метода удастся получить лишь самую общую оценку процессов теплообмена в зоне резания. Более полная их оценка может быть получена только на основе экспериментального изучения температурных полей в зоне резания.

Экспериментальное исследование температурных полей в зоне резания осложняется из-за малых ее размеров и высоких температурных градиентов. Поэтому далеко не все из известных способов измерения температуры нашли применение в исследованиях процесса резания. Наиболее успешным оказалось использование следующих методов:

- 1) метода термопар;
- 2) метода термочувствительных покрытий;
- 3) радиационного метода.

Метод термопар используется для определения локальных и средних температур в изделии и резце. Принцип действия термопары основан на возникновении в месте плотного контакта разнородных электропроводящих материалов так называемой контактной разности электрических потенциалов, зависящей от температуры контакта.

Конструкция термопары, предназначенной для измерения температуры твердого тела, зависит от конкретной задачи исследования. Для определения температуры поверхностей используют **прижимные** термопары, для ее определения внутри тела - **закладные** термопары, размещаемые в специально просверленных отверстиях или канавках (для разъемных образцов). Как прижимные, так и закладные термопары могут быть составлены из составных термоэлектродов. Обычно это проволоочки специальных сплавов, обеспечивающих необходимую чувствительность спая в соответствии с пределами изменения измеряемой температуры. Такие термопары принято называть **искусственными**. Конструктивно более компактными являются **полуискусственные** термопары, в которых функции одного из термоэлектродов выполняет само исследуемое тело (которое в этом случае должно быть электропроводным).

Метод термопар, получил достаточно широкое распространение в исследовании процесса резания. Однако, он имеет ряд недостатков. Его основные недостатки:

- 1) любая термопара фиксирует температуру не в точке, а на некотором участке, зависящем от размеров рабочего (горячего) спая;
- 2) термопара своим подключением к месту измерения играет роль стока тепла и поэтому изменяет тепловую обстановку в окрестности исследуемой точки.

Указанные недостатки снижают возможности термопары как средства исследования температурных полей и заставляют искать иные методы решения этой задачи. Одним из них является метод **термочувствительных покрытий** (он же - метод термоиндикаторов). Этот метод основан на способности многих веществ изменять те или иные свойства при некоторой фиксированной

температуре. В зависимости от природы вещества такими свойствами могут быть цвет (термокраски), агрегатное состояние (плавкие покрытия), кристаллическая структура и др.

Принцип применения термочувствительных покрытий для исследования температурного поля весьма прост и заключается в следующем. На боковую поверхность нагреваемого объекта, например, лезвия инструмента, наносится тонкий слой термочувствительного покрытия, скажем, термокраски, которая меняет свой цвет при некоторой температуре θ_k .

Сразу же после начала резания боковая поверхность лезвия начинает нагреваться. При достижении на наиболее нагретых ее участках температуры θ_k цвет на этих участках изменяется и формируется линия цветораздела, являющаяся изотермой с параметром θ_k . С дальнейшим нагревом эта изотерма смещается и после достижения теплового равновесия занимает определенное положение, которое фиксируется (например, фотографируется). После фиксации изотермы θ_k процесс резания останавливают и на предварительно очищенную боковую поверхность инструмента наносят новое покрытие с иной температурой превращения (θ_{k1}). Опыт повторяется, что позволяет получить изотерму с параметром θ_{k1} . Многократное повторение подобных опытов дает возможность построить стационарное температурное поле лезвия полностью.

Современный ассортимент термочувствительных веществ очень широк и позволяет фиксировать температуру с интервалом всего в несколько градусов. Поэтому возможности описанного метода достаточно широки. Его недостатки: высокая трудоемкость и сложность применения для квазистационарных температурных полей.

Радиационный метод исследования температурных полей основан на использовании различных фотоэлектрических устройств, работающих в инфракрасной части спектра. В применении к исследованию процесса резания этот метод известен в двух вариантах. В первом, предложенном еще в 1932 году (Ф. Шверд, Германия), в качестве измерительного устройства используется фотоэлектрический прибор типа пирометра, оснащенный высокочувствительным фотоэлементом и совершенной оптической системой. Разрешающая способность такого прибора составляет самое большее 1 мм^2 нагретой поверхности. Это достаточно для грубой оценки температурного поля инструмента, но совершенно недостаточно для исследования других участков зоны резания, где градиенты температур высоки.

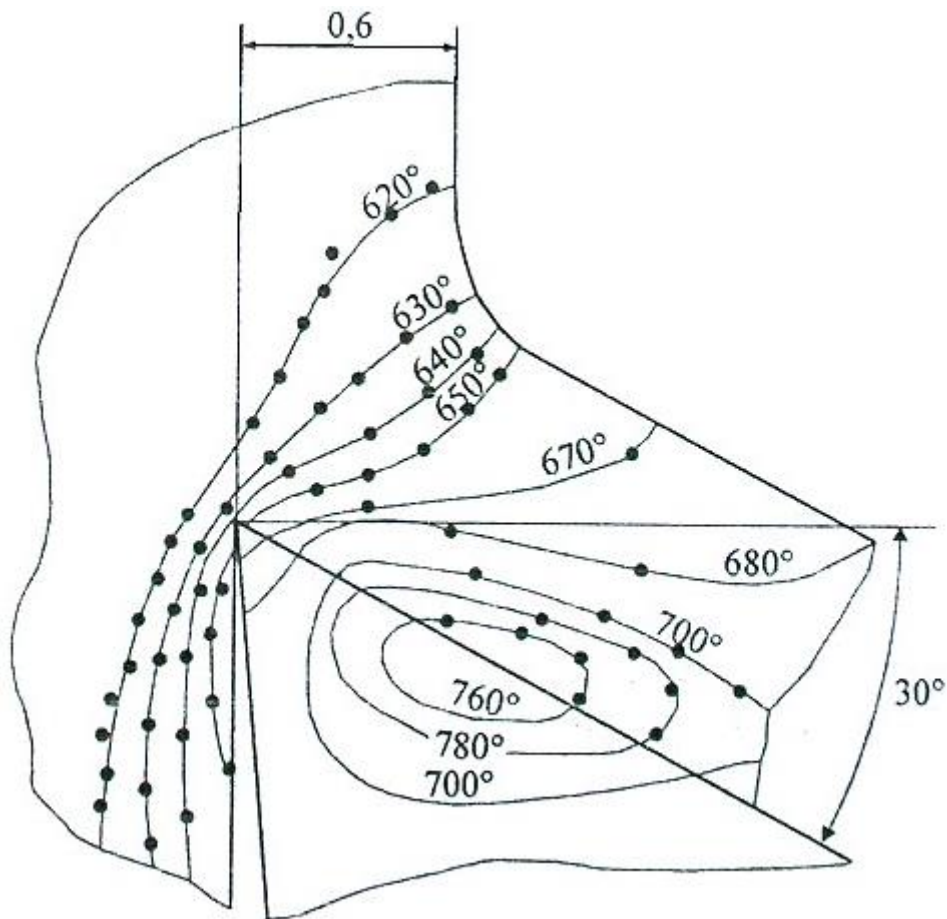


Рис. 21. Температурные поля в зоне резания, найденные экспериментально при резании стали с помощью радиационного метода: передний угол $\gamma=30^\circ$, скорость резания $V=23$ м/мин, подача $S=0,6$ мм/об; значения температур даны в $^\circ\text{C}$ (опыт Г. Бутройда, Англия)

Во втором варианте радиационного метода фотоэлектрическое устройство используется для фотографирования в инфракрасном излучении всей боковой поверхности зоны резания. Затем распределение плотности полученного негатива изучается с помощью специального прибора - микроденситометра, что позволяет воспроизвести температурные поля на боковых сторонах всех трех тел, участвующих в теплообмене: изделия, стружки и резца. Результат подобного исследования приведен на рис.21.

Инструментальные материалы

В современном машиностроении широко применяется огромное количество разнообразных режущих инструментов, используемых на различных металлорежущих станках, автоматах, автоматических линиях и автоматизированных цехах, для выполнения сложнейших технологических процессов механической обработки деталей.

От правильного выбора материала инструмента, рациональной геометрии режущей части инструмента и режимов резания зависит **производительность** процесса обработки.

Материал, применяемый для изготовления инструмента, должен обладать достаточной **твердостью** и **прочностью**, **износостойкостью** и **теплостойкостью**.

Твердость является важнейшим фактором при определении режущих свойств инструментального материала.

Твердость материала инструмента должна быть значительно выше твердости обрабатываемого материала; для инструментальной стали после термической обработки значение твердости составляет *HRC* 60—65.

Режущий инструмент под действием сил резания подвергается сжатию, изгибу, кручению и другим видам деформации.

Способность инструмента сопротивляться воздействию указанных сил характеризуется **прочностью**, исключающей возможность поломок инструмента при резании.

От **прочности** инструментального материала зависит возможность использования инструмента при больших нагрузках на обдирочных операциях противостоять вибрациям и ударным нагрузкам.

Следует указать, что для надежной работы любого режущего инструмента существенное значение имеет прочность не только режущей части, но также прочность и не режущих элементов инструмента (державок, корпусов, хвостовиков и т. д.).

Износостойкость инструментального материала характеризуется сопротивляемостью истирающему действию сил трения, возникающих в процессе резания на передних и задних поверхностях инструмента, и режущие кромки подвергаются износу (истиранию), в результате чего и происходит износ режущих кромок и затупление инструмента. Следовательно, с повышением сопротивляемости истиранию, т. е. **износостойкости** инструментального материала, повышаются режущие свойства и возрастает стойкость инструмента.

Твердость и **прочность** инструментального материала зависит также и от **температуры**, при которой работает инструмент. Сохранение достаточной твердости, а следовательно и режущих свойств при высоких температурах характеризуется **теплостойкостью** (температурной стойкостью). С повышением температуры твердость и прочность материала уменьшаются, что приводит к снижению стойкости режущего инструмента. Способность инструмента сопротивляться размягчению при высокой температуре резания (500—600° и выше) называется **красностойкостью**.

Красностойкость инструментальных сталей повышается при добавлении в их состав хрома, ванадия и особенно вольфрама.

Изложенное показывает, что свойства инструментального материала оказывают существенное влияние на стойкость инструмента и его режущие свойства.

Стойкостью инструмента называется способность его сопротивляться механическому износу и воздействию высокой температуры, которая в процессе резания может достигать до 800° и выше. Для определенного режима работы **стойкость** режущего инструмента измеряется **машинным временем**, в течение которого сохраняются режущие свойства инструмента, т. е., временем непосредственного резания между двумя переточками инструмента.

Для изготовления различных режущих инструментов применяют: 1) легированные инструментальные стали; 2) быстрорежущие стали; 3) металлокерамические твердые сплавы; 4) минерало-керамические материалы; 5) абразивные материалы, сверхтвердые материалы.

Кроме указанных материалов, при изготовлении державок резцов, корпусов фрез, хвостовиков сверл, разверток и других инструментов применяют конструкционные стали (сталь марок 40, 45, 50, 45Х и др.).

Легированные инструментальные стали характеризуются наличием в их химическом составе легирующих элементов: хрома, вольфрама, ванадия и др., а также повышенным содержанием марганца и кремния.

Хром повышает твердость стали, обеспечивая ее глубокую прокаливаемость, и повышает сопротивляемость износу; вольфрам повышает теплостойкость стали.

Для изготовления режущего инструмента применяют следующие легированные инструментальные стали: 9ХС — для изготовления сверл, разверток, фрез, метчиков и плашек; В1 — для сверл, разверток, метчиков; ХВ5 — для резцов и фрез при обработке твердых металлов (закаленная сталь и твердый чугун); ХВГ и ХГ — для инструментов, при изготовлении которых крайне нежелательна деформация (коробление) их при закалке (протяжки, длинные развертки, метчики и т. д.). Цифры слева от букв обозначают содержание углерода в десятых долях процента. Цифры справа от букв обозначают среднее содержание в целых процентах соответствующего легирующего элемента.

Легированная инструментальная сталь допускает в процессе резания температуру нагрева до $250\text{—}300^{\circ}$.

Быстрорежущая сталь применяется для многих режущих инструментов самого разнообразного назначения. Она имеет повышенное содержание вольфрама, хрома и ванадия — и сохраняет благодаря этому свои режущие свойства при сравнительно высокой температуре нагрева ($550\text{—}600^{\circ}$).

Самыми эффективными марками быстрорежущей стали при резании являются Р18 и Р9 (цифры показывают среднее содержание вольфрама в процентах). Химический состав быстрорежущей стали этих марок приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав быстрорежущей стали в %

Марка быстрорежущей стали	С	Mr	Si	Cr	W	V	Mo	Ni	S	F
		не более					не более			
P18	0,7-0,8	0,4	0,4	3,8-4,4	17,5-19	1-1,4	0,3	0,4	0,03	0,03
P9	0,85-0,95	0,4	0,4	3,8-4,4	8,5-10	2-2,6	0,3	0,4	0,03	0,03

Высокая теплостойкость (красностойкость) и повышенная твердость обусловили возможность применения сталей P9 и P18 для изготовления большинства режущих инструментов.

Стали P9 и P18 обладают примерно одинаковыми режущими свойствами, но повышенное содержание ванадия (V) в стали марки P9 (табл. 1) затрудняет процесс ее шлифования/затачивания.

Твердые сплавы изготавливаются из мелкозернистых порошков тугоплавких металлов: карбида вольфрама, карбида титана и цементирующего вещества — кобальта.

Карбиды вольфрама и титана, представляющие собой химическое соединение вольфрама и титана с углеродом, обладают очень большой твердостью, высокой износо- и теплостойкостью, благодаря чему режущие свойства твердых сплавов сохраняются при нагреве до температуры 900—1000° и скорости резания до 3000 — 3500 м/мин.

Применяемые твердые сплавы разделяются на две основные группы:

- а) вольфрамовую, обозначаемую ВК;
- б) титановольфрамовую, обозначаемую ТК;
- в) титанотанталовольфрамовую, обозначаемую ТТК.

Сплавы вольфрамовой группы — однокарбидные: их основой является карбид вольфрама WC, а цементирующей связкой — металлический кобальт. Вольфрамовые сплавы изготавливаются следующих марок: ВК2, ВК3, ВК4, ВК6, ВК8, ВК10, ВК11, ВК15.

Сплавы титановольфрамовой группы — двухкарбидные: они состоят из карбида вольфрама WC, карбида титана TiC и цементирующей связки — кобальта. Титановольфрамовые сплавы изготавливаются следующих марок: Т5К10, Т14К8, Т15К6, Т30К4, Т60К2.

Кобальт (Co) является связующим веществом и придает сплаву вязкость. Чем больше кобальта содержит твердый сплав, тем он вязче.

Твердые сплавы по своим механическим качествам значительно отличаются от быстрорежущей стали. Твердость же сплавов характеризуется твердостью карбидов, входящих в данный сплав. Вольфрамовые сплавы (ВК) имеют твердость в пределах HRA 88—89 и титановольфрамовые (ТК) HRA 88,5—91.

Удельный вес твердых сплавов значительно выше удельного веса стали и колеблется в пределах 9,5—14,9.

Вольфрамовые сплавы, обладающие повышенной вязкостью и меньшей хрупкостью, применяются в основном для обработки чугуна и цветных металлов, а также для обработки закаленных и трудно обрабатываемых сталей.

Сплавы ВК10, ВК11 и ВК15 хорошо сопротивляются ударным нагрузкам и применяются главным образом для волочильного, штампового и дыропробивного инструмента. В качестве режущего инструмента эти сплавы применяются только при черновой обработке специальных труднообрабатываемых сталей.

Титановольфрамовые сплавы по сравнению с вольфрамовыми сплавами имеют значительно меньший коэффициент трения, меньшую слипаемость (свариваемость) передней поверхности со стальной стружкой и, как следствие, повышенную сопротивляемость износу. Эти сплавы используются для обработки сталей различных марок.

Следует указать на весьма широкое применение сплава Т15К6, который по своим режущим свойствам зарекомендовал себя как один из наилучших сплавов для обработки стали с большими скоростями резания.

Сплавы Т30К4 и Т60К2 применяются для чистовой обработки стали с малыми сечениями стружки и большими скоростями резания. Эти сплавы допускают весьма высокие скорости резания, хотя и являются наиболее хрупкими.

Трехкарбидные сплавы (группа М), кроме карбидов вольфрама и титана, содержат еще и карбид тантала. Марки этих сплавов: ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8Б, ТТ20К9. Здесь первая цифра означает сумму взаиморастворенных карбидов титана и тантала. Из-за повышенного сопротивления разрушению при ударной нагрузке сплав марки ТТ7К12 рекомендуется для чернового точения стальных поковок, а также для строгания и фрезерования. Другие марки трехкарбидных твердых сплавов рекомендуются для резания труднообрабатываемых сталей и сплавов.

На режущие свойства и прочность твердых сплавов влияет не только химический состав, но и структура, в частности размер зерен карбидов. Причем с увеличением размера зерен карбида вольфрама (WC) прочность сплава возрастает, а износостойкость несколько снижается. С уменьшением размера зерна имеет место обратная картина изменения свойств твердого сплава.

С целью экономии дефицитных вольфрама и кобальта в нашей стране и за рубежом разработана группа **безвольфрамовых твердых сплавов** на основе карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой (до 12... 19%). В их числе отечественные сплавы марок ТН20, КТН-16, КТН-20, КТН-30. Они обладают низким коэффициентом трения, высокими износо- и окалиностойкостью, но имеют низкую прочность, чувствительны к ударным и тепловым нагрузкам, поэтому их рекомендуется использовать на чистовых операциях взамен сплавов группы ТК.

Заточка твердосплавных пластинок производится шлифовальными кругами средней мягкости, зернистостью 46—60. После заточки рекомендуется производить доводку резцов, которая осуществляется на вращающемся чугунном диске пастой карбида бора или зеленым карбидом кремния зернистостью 220—320, смачиваемым керосином. Скорость доводочного диска 1—2 м/сек.

Твердые сплавы, получающие в процессе спекания высокую твердость, не требуют никакой термической обработки. Однако следует иметь в виду, что твердые сплавы вследствие их повышенной хрупкости обладают склонностью к

выкрашиванию, которое проявляется особенно сильно при работе с ударом и наличии вибраций.

Для изготовления режущего инструмента расходуется большое количество дорогостоящих металлов.

Современные быстрорежущие стали содержат от 9 до 18% вольфрама, твердые сплавы содержат 70—95% карбидов вольфрама, от 5 до 50% карбидов титана и от 3 до 15% кобальта. Поэтому были разработаны режущие пластины из минералокерамики, которая не содержит дорогостоящих составляющих, таких, как вольфрам, титан и кобальт.

В настоящее время керамику выпускают двух основных марок: термкорунд ТВ и микролит ЦМ.

Лучшими режущими свойствами обладает минералокерамика марки ЦМ-332.

Минералокерамические пластинки изготавливаются на основе окиси алюминия Al_2O_3 методом прессования с последующей термической обработкой.

Минералокерамика представляет собой пластинки белого цвета, напоминающие фарфор.

Керамика обладает высокой твердостью ($HRA = 90 - 93$), неокисляемостью и высокой температурной стойкостью ($1100—1200^\circ$).

Удельный вес составляет $3,75—3,90 \text{ г/см}^3$. Керамика не обладает склонностью к слипанию с обрабатываемым материалом, что создает более выгодные условия резания.

Керамика по сравнению с твердыми сплавами имеет более низкие механические свойства — повышенную хрупкость и плохую сопротивляемость изгибающим нагрузкам. Если твердые сплавы имеют предел прочности на сжатие до 400 кг/мм^2 и на изгиб до 130 кг/мм^2 , то предел прочности керамики на сжатие равен 250 кг/мм^2 и на изгиб $30—40 \text{ кг/мм}^2$.

Работа резцами, оснащенными минералокерамическими пластинками в условиях наличия ударной нагрузки и вибраций, может привести к выкрашиванию (сколу) режущей кромки пластинки и ее разрушению.

Вышеуказанные особенности нового инструментального материала делают его особенно выгодным для использования на чистовых и получистовых операциях при высоких скоростях резания.

Наиболее качественная керамика марки ЦМ332 позволяет на чистовых операциях работать со скоростью резания до 3500 м/мин .

Заточка керамических пластинок производится кругами из зеленого карбида кремния. После заточки обязательна доводка передней и задней поверхностей мелкозернистым порошком карбида бора на чугунных притирах.

АБРАЗИВНЫЙ МАТЕРИАЛ. Абразивные шлифовальные материалы бывают естественные и искусственные.

К естественным абразивным материалам принадлежат горные породы и минералы, обладающие высокой твердостью и способностью в измельченном виде или в виде единичных кристаллов осуществлять процесс резания (шлифования).

Важнейшими естественными абразивными материалами являются алмаз, корунд, наждак и кварц.

Алмаз является наиболее твердым из всех абразивных материалов и представляет собой одну из разновидностей кристаллического углерода. Алмазы имеют ограниченное применение ввиду их высокой стоимости. Технические алмазы в отдельных случаях применяются для правки профилей шлифовальных кругов для особо точных работ.

Естественный корунд представляет собой минерал, состоящий в основном из кристаллов окиси алюминия Al_2O_3 , но наличие различных примесей значительно снижает его режущие свойства.

Наждак состоит также из окиси алюминия с примесями окиси железа и силикатов и по своему составу весьма неоднороден. Применяется главным образом для изготовления абразивных шкур.

Кварц является одним из распространенных минералов, представляющих собой чистый кремнезем SiO_2 . Применяется для изготовления песчаных точил и различных абразивных брусков.

Для изготовления шлифовальных кругов и других абразивных инструментов в настоящее время применяют главным образом искусственные абразивные материалы: 1) электрокорунд; 2) карбид кремния; 3) карбид бора.

Электрокорунд является искусственным абразивным материалом, состоящим из кристаллической окиси алюминия Al_2O_3 . Получается путем плавки в электрических печах пород, богатых окисью алюминия (глинозем, бокситы). Полученная таким образом масса дробится на специальных дробилках в зерна различной величины. Полученные зерна тщательно очищают и сортируют по размерам.

В зависимости от содержания в электрокорунде окиси алюминия различают:

Нормальный электрокорунд Э (алунд), содержащий менее 87% кристаллической окиси алюминия..

Электрокорунд белый ЭБ (корракс), содержащий до 97—99% окиси алюминия.

С увеличением процента содержания окиси алюминия твердость электрокорунда повышается. Нормальный электрокорунд имеет обычно коричневый цвет и применяется для изготовления основной массы шлифовальных кругов.

Белый электрокорунд применяется для отделочных чистовых операций, так как зерна белого электрокорунда, имеющие сравнительно гладкую поверхность, сцепляются со связующим материалом-связкой — несколько хуже, чем зерна нормального электрокорунда, а следовательно, и менее прочно удерживаются в круге.

Электрокорундовые круги применяются главным образом для обработки сырой и закаленной стали, ковкого чугуна, мягкой бронзы.

За последнее время абразивная промышленность выпускает разновидность электрокорунда — **монокорунд М**, представляющий собой кристаллическую окись алюминия Al_2O_3 . Монокорунд отличается высокой прочностью и более высокими режущими свойствами, чем электрокорунд Э и ЭБ.

Круги из монокорунда имеют стойкость примерно в 2 раза большую, чем обычные круги.

Карбид кремния представляет собой соединение кремния с углеродом (SiC) и получается путем электроплавки чистого кварцевого песка с коксом при температуре 2100—2200°.

Зерна карбида кремния имеют высокую твердость и дают при дроблении острые режущие кромки. Карбид кремния изготавливается двух видов: черный карбид кремния КЧ, содержащий карбида кремния не менее 95%, и зеленый карбид кремния КЗ, имеющий карбида кремния не менее 97% и обладающий повышенной твердостью.

В качестве искусственного абразивного материала применяется в промышленности **карбид бора** (соединение бора с углеродом B_4C), обладающий большой твердостью и высокой хрупкостью. Широко применяется для доводки твердых сплавов и притирочных работ. Карбид бора получается сплавлением технической борной кислоты и нефтяного кокса в электрических печах. По внешнему виду карбид бора представляет черную сплавленную массу, после дробления которой получают зерна с острыми режущими кромками.

Алмаз - одна из модификаций углерода. Благодаря кубическому строению кристаллической решетки алмаз является самым твердым из известных в природе минералов. Его твердость в 5 раз выше, чем твердого сплава, однако прочность его невелика и он раскалывается по плоскостям спайкости. Поэтому алмазы используют только на чистовых операциях, для которых характерны малые силовые нагрузки.

Природный алмаз обозначают буквой А, синтетический - АС. Технические алмазы имеют вид сростков кристаллов и агрегатов. Синтетические алмазы получают в виде мелкозернистых порошков и используют для изготовления абразивных кругов, паст и т.д.

Природные алмазы применяют в основном при тонком точении цветных металлов и сплавов, не содержащих углерод и железо. Теплостойкость алмазов равна 700...800° С (при более высоких температурах алмаз сгорает). Природные алмазы имеют высокую теплопроводность и самый низкий коэффициент трения.

Кубический нитрид бора (КНБ) в природе не встречается, его получают искусственным путем из «белого графита» при высоких давлениях и температурах в присутствии катализаторов. При этом гексагональная решетка графита превращается в кубическую, подобную решетке алмаза. По твердости КНБ несколько уступает алмазу, но имеет высокую теплостойкость, достигающую до 1300...1500 °С, и практически инертен к углероду и железу. Как и алмаз, КНБ имеет повышенную хрупкость и низкую прочность на изгиб.

Известно несколько марок КНБ, объединяемых в группу «композиты». Разновидности КНБ отличаются друг от друга размерами, структурой и свойствами зерен, процентным составом связки: металлов, карбидов, карбонитратов, оксидов и других, а также технологией спекания.

В качестве композитов наиболее широкое применение нашли: композит 01 (эльбор), композит 10 (гексанит-Р) и композит 05. Из них самым прочным является композит 10 ($\sigma_{\text{н}} = 1000... 1500$ МПа), поэтому его используют при ударных нагрузках. Остальные композиты применяются при безударной

чистовой обработке закаленных сталей, высокопрочных чугунов и некоторых труднообрабатываемых сплавов.

**Физико-механические свойства и область применения основных марок
твердых сплавов**

Марка сплава	Примерный химический состав в %			Физико-механические свойства			Примерное назначение
	Карбид вольфрама WC	Кобальт Co	Карбид титана TiC	Предел прочности при изгибе в кг/мм^2	Удельный вес	Твердость RA	
ВК2 ВК3	98 97	2 3	— —	100	14,9	89	Для чистовой обработки твердого чугуна, стекла, мрамора
ВК6	94	6	—	120	14,6	88,5	Для получистовой обработки чугуна и цветных сплавов
ВК8	92	8	—	130	14,4	88	Для черновой и получистовой обработки чугуна, цветных металлов и сплавов, а также для некоторых видов обработки сталей
T5K10	85	9	6	115	12,4	88,5	Для черновой обработки стали с неравномерной стружкой и при прерывистом резании
T15K6 T14K8	79 78	6 8	15 14	110	11,1	90	Для обработки стали с равномерной стружкой и при непрерывном резании
T30K4 T60K2	66 34	4 6	30 60	90	9,5	91	Для чистовой обработки стали при непрерывном резании

Влияние различных факторов на скорость резания

Эффективность и качество изготовления деталей машин зависят от рационального проведения процессов обработки металлов резанием, которое достигается в том случае, если:

а) режущая часть инструмента имеет оптимальные геометрические параметры и качественную заточку лезвий;

б) обработка заготовок ведется с технически и экономически обоснованными подачами и скоростями резания;

в) кинематические и динамические возможности коробки подач и коробки скоростей станка позволяют реализовать обоснованные значения подачи и скорости резания.

Одним из важнейших элементов процесса резания является **скорость резания**.

Вообще под термином **режимы резания** понимается совокупность числовых значений глубины резания, подачи, скорости резания, геометрических параметров и стойкости режущей части инструментов, а также силы резания, мощности и других параметров рабочего процесса резания, от которых зависят его технико-экономические показатели. Рациональные режимы резания, это те, при которых в процессе резания получают высокие технико-экономические показатели. Режимные параметры взаимосвязаны и поэтому нельзя произвольно изменять значение хотя бы одного из них, не изменяя соответствующим образом всех прочих.

Скоростью резания называется величина перемещения заготовки относительно режущей кромки инструмента в единицу времени (в минуту) в направлении главного движения.

Скорость резания измеряется в метрах в минуту и определяется по формуле

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

где $\pi = 3,14$;

D – диаметр обрабатываемой поверхности в мм;

n – число оборотов в минуту.

Если известны скорость резания V и диаметр заготовки D , то число оборотов шпинделя станка в минуту определяется по формуле:

$$n = \frac{1000V}{\pi D} \text{ об/мин.}$$

Выполнение обработки на высоких скоростях резания обеспечивает снижение машинного времени, повышение производительности труда и улучшение чистоты обработанной поверхности.

Скорость резания зависит от следующих факторов:

- 1) механических свойств обрабатываемого материала;
- 2) материала режущей части резца;
- 3) стойкости режущего инструмента (фактическое время работы инструмента от переточки до переточки);
- 4) подачи и глубины резания;
- 5) геометрических элементов режущей части резца;

б) охлаждения.

Влияние свойств обрабатываемого материала на скорость резания

Из механических свойств обрабатываемого материала наибольшее влияние на величину скорости резания оказывают предел прочности при растяжении σ_p и твердость $HВ$ материала.

С повышением механических свойств обрабатываемого материала требуется затратить больше работы на процесс резания, при этом больше выделяется тепла, интенсивнее происходит износ режущего инструмента, и, следовательно, скорость резания при постоянной стойкости инструмента должна быть снижена.

На выбор скорости резания оказывает влияние и состояние обрабатываемой поверхности заготовки. Например, у поковок и литых деталей, на поверхности имеется окалина или литейная корка повышенной твердости.

В некоторых случаях металлы с высокими механическими свойствами допускают большие скорости резания, чем металлы с более низкими механическими свойствами при одинаковой стойкости инструмента. Например, автоматные стали, имеющие повышенное содержание серы (до 0,30%), фосфора (до 0,15%) и марганца (до 1,55%), имеют лучшую обрабатываемость, чем углеродистые стали одинаковой с автоматными сталями твердости, так как повышенное содержание серы и марганца создает мягкие включения сернистого марганца, не оказывающего абразивное действие на режущий инструмент.

Наихудшей обрабатываемостью обладают быстрорежущие стали, хромомарганцовистые, хромомолибденовые, хромоникеле-вольфрамовые и особенно жаропрочные стали вследствие их низкой теплопроводности. Серый чугун может быть обработан с меньшей скоростью резания по сравнению с углеродистой конструкционной сталью ввиду большого истирающего действия чугуна на инструмент и его более низкой теплопроводности.

Алюминий и его сплавы обрабатываются со значительно большими скоростями резания по сравнению с углеродистой конструкционной сталью.

Влияние стойкости режущего инструмента на скорость резания

В процессе резания металлов режущий инструмент подвергается воздействию обрабатываемого материала и сходящей стружки. В результате этого воздействия происходит износ инструмента в виде истирания поверхностей и выкрашивания режущей кромки.

В результате истирания поверхностей инструмента наступает момент, когда дальнейшее продолжение работы становится невозможным. Тогда считают, что инструмент затупился, и его направляют на переточку.

Износ реза происходит в основном в результате трения сходящей стружки о переднюю поверхность реза и задних поверхностей реза о поверхности заготовки.

При работе режущих инструментов имеет место их износ как по передней, так и по задним поверхностям, однако в зависимости от условий обработки может преобладать тот или иной вид износа.

Износ по задней поверхности характеризуется высотой поверхности площадки h_3 , имеющей задний угол, равный нулю.

Износ по передней поверхности характеризуется глубиной и шириной лунки.

При обработке хрупких металлов износ происходит в основном по задней поверхности, так как стружка надлома производит малое истирающее действие передней поверхности, в то время как задние поверхности находятся в постоянном контакте.

Преобладающий износ по передней поверхности наблюдается чаще всего при обработке пластичных металлов с большими скоростями при сливной стружке.

Для резцов с пластинками твердого сплава вследствие их относительной хрупкости, износ по задней поверхности обычно больше чем по передней.

Применение смазочно-охлаждающей жидкости уменьшает износ инструмента.

Вибрация в процессе резания приводит к более интенсивному выкрашиванию режущей кромки резцов.

Между скоростью резания v и стойкостью T (периодом стойкости) режущего инструмента существует зависимость, заключающаяся в том, что с повышением скорости резания стойкость инструмента снижается. Эта зависимость согласно экспериментальным данным приведена на графике (рис. 22) и может быть выражена формулой:

$$V = \frac{A}{T^m}$$

где A — постоянная, зависящая от свойств обрабатываемого материала, глубины резания, подачи, материала режущей части резца, геометрии инструмента;

T — время работы резца до затупления (стойкость резца) мин.;

m — показатель степени, зависящий от свойств обрабатываемого материала, материала режущей части резца и характера обработки.

Влияние подачи и глубины резания на скорость резания

С увеличением подачи увеличивается толщина среза, повышаются силы резания, увеличивается количество выделяемого тепла. Это приводит к ускорению износа резца, к снижению его стойкости, а следовательно, к необходимости уменьшения скорости резания.

При увеличении глубины резания или ширины среза также возрастают силы резания, увеличивается работа резания и количество выделяемого тепла, что также ведет к снижению стойкости резца, а следовательно, к необходимости уменьшения скорости резания.

В общем виде зависимость скорости резания от глубины резания и подачи может быть выражена следующей формулой:

$$V = \frac{C_v}{t^{x_v} \cdot s^{y_v}}$$

где C_v — коэффициент, зависящий от условий обработки (обрабатываемого металла, материала режущей части инструмента, геометрии резца, охлаждения и т. п.);

t — глубина резания в мм;

s — подача в мм/об;

x_v, y_v — показатели степеней.

Из формулы следует, что с увеличением глубины резания и подачи, т. е. с увеличением площади поперечного сечения среза, скорость резания должна быть уменьшена.

С увеличением подачи скорость резания уменьшается более значительно, чем таком же увеличении глубины резания. Отсюда следует, что при одинаковой площади поперечного сечения среза выгоднее работать с меньшей подачей и большей глубиной резания.

Это положение справедливо для прямых срезов; при обратных срезах, например, при чистовой и получистовой обработке широкими резцами, наблюдается обратная картина.

Влияние геометрических элементов резца на скорость резания

Передний угол. При увеличении переднего угла γ уменьшается деформация срезаемого слоя, уменьшаются силы резания и тепловыделение; стойкость резца при этом повышается до некоторого предела. Однако, начиная с некоторого значения переднего угла γ увеличение этого угла и уменьшение угла заострения приводит к повышению температуры режущей кромки, к уменьшению прочности режущей части резца и к снижению стойкости инструмента и допускаемой скорости резания. Следовательно, в зависимости от обрабатываемого материала с увеличением толщины среза значение переднего угла следует уменьшать. *(Другими словами, в зависимости от обрабатываемого материала и условий обработки следует выбирать такое значение переднего угла, при котором стойкость, а следовательно, и скорость резания будут наибольшими.)*

Задний угол. С увеличением заднего угла уменьшается трение резца о заготовку, уменьшаются силы, действующие на задней поверхности резца, и повышается стойкость инструмента. Однако следует иметь в виду, что с увеличением заднего угла уменьшается угол заострения, ослабляется режущая кромка, ухудшается отвод тепла от режущей кромки, что ведет к снижению стойкости резца.

Проведенные исследования показывают, что с увеличением заднего угла стойкость резца первоначально увеличивается, так как уменьшается работа трения по задней поверхности резца, а в дальнейшем, при уменьшении угла заострения, стойкость уменьшается из-за ухудшения отвода тепла и возможности выкрашивания режущей кромки.

Оптимальное значение главного заднего угла выбирают в зависимости от толщины среза или величины подачи; практически величина этого угла изменяется в пределах $6—15^\circ$. С уменьшением толщины срезаемого слоя или величины подачи уменьшается сила, действующая на режущую кромку, что допускает увеличение заднего угла, и наоборот.

Главный угол в плане. Главный угол в плане ϕ оказывает наиболее сильное влияние на стойкость резца, а следовательно, и на скорость резания по сравнению с другими геометрическими параметрами резца.

С увеличением главного угла в плане при постоянной величине подачи и глубине резания увеличивается толщина и уменьшается ширина среза. В связи с уменьшением длины режущей кромки, участвующей непосредственно в резании (активная часть режущей кромки), повышается тепловая нагрузка, приходящаяся на единицу длины режущей кромки, повышается износ резца, снижается его стойкость. Если же угол в плане уменьшается, наблюдается обратное явление: уменьшается тепловая нагрузка на единицу длины режущей кромки и повышается стойкость резца. (пример упорный резец)

Влияние охлаждения на скорость резания

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей оказывает существенное влияние на понижение температуры в процессе резания, на повышение стойкости инструмента, а следовательно, на повышение скорости резания, допускаемой инструментом.

Эффективность применения охлаждения зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, применяемой смазочно-охлаждающей жидкости, интенсивности охлаждения (количества подводимой жидкости в минуту) и от способа ее подвода к зоне резания.

При резании вязких металлов, когда имеет место значительная пластическая деформация и повышенное тепловыделение, вызванное этой деформацией, применение охлаждения является особо эффективным. При обильном охлаждении с интенсивностью 8—12 л/мин при точении стали резцами из быстрорежущей стали допускается повышение скорости резания на 20-25%, а при точении серого чугуна — на 12—15%.

Меньший эффект охлаждения при обработке чугуна объясняется тем, что в данном случае на износ резца влияет главным образом механическое истирание, а не высокая температура резания.

Практика показывает, что при работе резцами, оснащенными твердым сплавом, влияние охлаждения на скорость резания сказывается в меньшей степени, чем для резцов из быстрорежущей стали, так как твердые сплавы имеют более высокую теплостойкость (900—1000°).

Эффективность охлаждения возрастает с повышением сечения среза. Если при черновой обработке применение охлаждения допускает увеличение скорости резания на 15—25%, то при чистовой обработке увеличение скорости составляет не более 5—8%.

В настоящее время применяют следующие смазочно-охлаждающие жидкости:

I. Водные растворы: содовые растворы; мыльные растворы; эмульсии (смесь масляных продуктов с водой).

II. Масла и жиры: растительные масла (льняное, сурепное); минеральные масла (веретенное, соляровое); осерненные масла (сульфофрезолы).

Эффективность применения охлаждения при резании металлов выражается коэффициентом $K_{Oв}$, представляющим собой отношение скорости резания,

допускаемой при работе с охлаждением, к скорости резания, допускаемой при работе всухую:

В табл. 3 приведены значения коэффициентов K_{Ov} для различных металлов.

Таблица 3

Значение коэффициента K_{Ov}

Обрабатываемый материал		Значение коэффициента K_{Ov}
Сталь $\sigma_b=30\div 50$ кГ/мм ²		1,25
Сталь $\sigma_b=50\div 70$ кГ/мм ²		1,20
Сталь $\sigma_b=80\div 100$ кГ/мм ²		1,15
Ковкий чугун	мягкий	1,20
	средний	1,15
	твердый	1,05 – 1,10

При обработке труднообрабатываемых сталей находит применение охлаждение высоконапорной струей. В этом случае смазочно-охлаждающая жидкость под большим давлением (20—30 ат) подводится к режущей кромке резца снизу, со стороны задней поверхности, через узкую щель шланга. При таком подводе охлаждения жидкость лучше проникает в микрощели, уменьшает трение и интенсивнее отводит тепло. При высоконапорном охлаждении при обработке жаропрочных сплавов наблюдается значительное повышение стойкости резца по сравнению с обычным методом охлаждения.

В последнее время для обработки труднообрабатываемых материалов в качестве СОЖ используют жидкий азот, но эффекты, возникающие при этом, практически не изучены.

ТОКАРНЫЕ РЕЗЦЫ

Резцы отличаются по назначению (виду обработки), по направлению подачи, по конструкции головки. Помимо этого, резцы отличаются по своим конструктивным особенностям, по материалу режущей части, по сечению тела и способу крепления режущей части резца с телом.

В практике применяются главным образом призматические резцы и значительно реже — дисковые.

В зависимости от вида выполняемой работы токарные резцы делятся на проходные, подрезные, расточные, отрезные, прорезные, галтельные, резьбовые и фасонные (рис. 22).

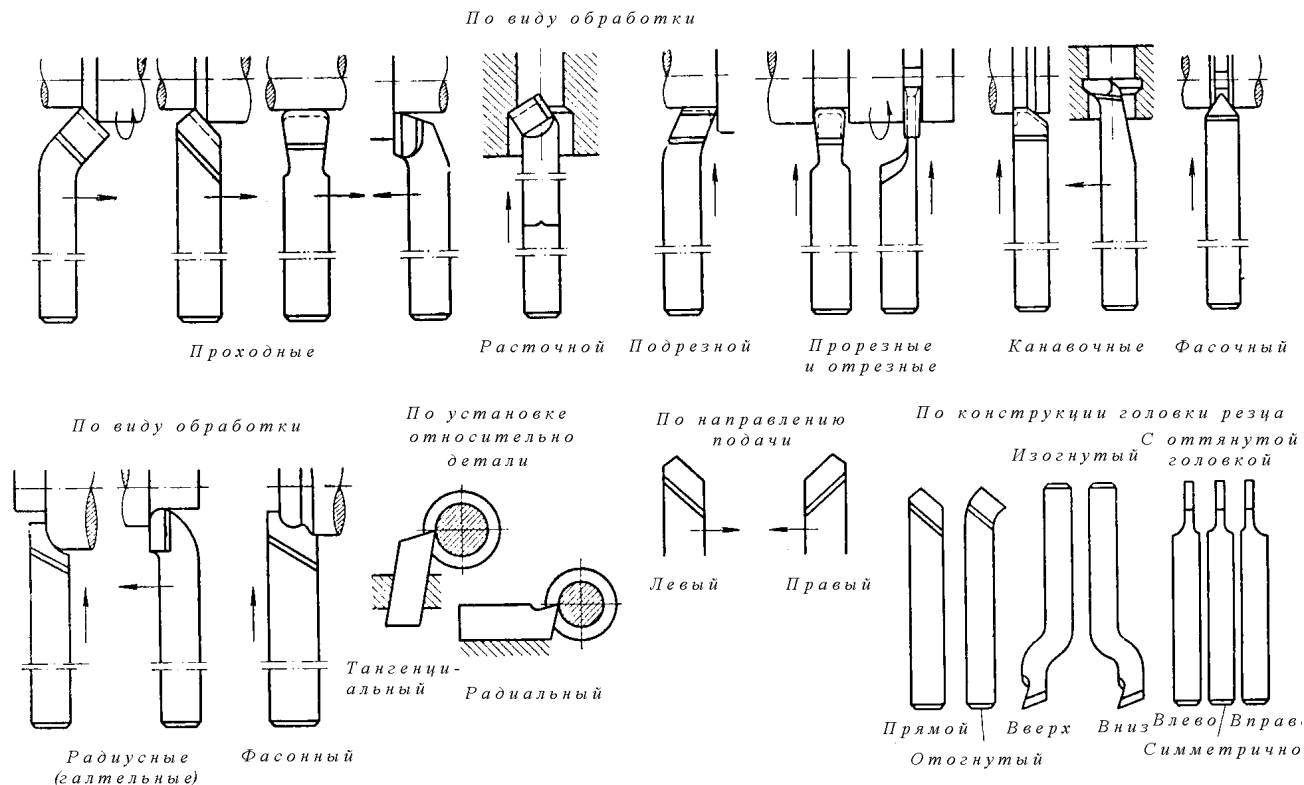


Рис. 22. Типы токарных резцов

В зависимости от расположения главной режущей кромки и направления подачи различают правые и левые резцы. Правыми проходными резцами ведут обработку справа налево в направлении от задней бабки к передней бабке, а левыми резцами — слева направо.

Резцы могут быть как прямыми, так и отогнутыми.

По способу соединения режущей части резца с телом различают цельные, напайные и наварные резцы, резцы с механическим креплением пластинок и резцы, у которых крепление пластинок осуществляется силами резания.

В качестве материала режущей части резцов применяются инструментальные стали, пластинки из быстрорежущей стали, пластинки твердых сплавов и минералокерамики. Следует отметить, что в настоящее время свыше 85% всех токарных резцов оснащаются пластинками из твердых сплавов.

Основной формой сечения резцов является прямоугольное как обладающее наибольшей жесткостью по сравнению с другими сечениями; квадратное сечение используется при небольшой высоте резца для автоматов, револьверных, долбежных и расточных станков. Выбор сечения резца обычно производится в зависимости от площади поперечного сечения среза и условий обработки.

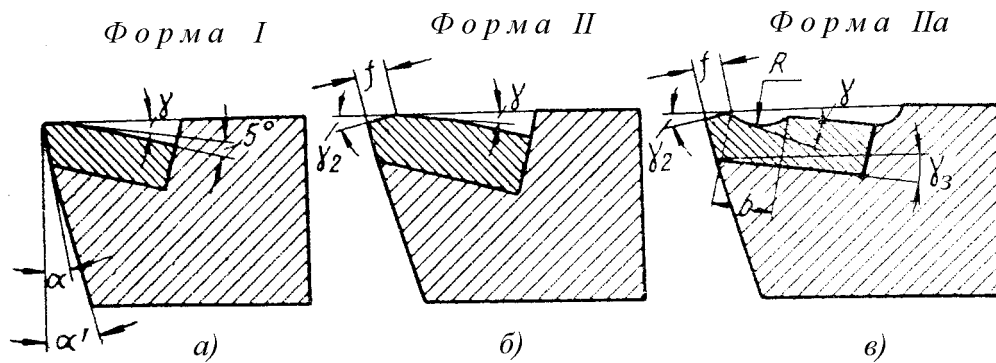


Рис. 23. Форма передней поверхности резцов: а) – плоская; б) – с фаской отрицательным передним углом; в) – с выкружкой/лункой и фаской.

Передняя поверхность резцов имеет несколько форм. На рис. 23а, показана плоская форма передней поверхности с положительным передним углом. (Применяется она при обработке чугуна, а также стали с подачей до 0,2—0,3 мм/об.

Передняя поверхность с фаской и отрицательным углом 23б. Ширина фаски f выбирается в зависимости от подачи: при $s > 0,2$ мм/об значения $f = (0,8 \div 1,0)s$ мм; при $s < 0,2$ мм/об фаска должна быть не шире 0,2 мм.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЦОВ ДРУГИХ ТИПОВ

Из других типов токарных резцов широкое распространение получили подрезные, расточные и отрезные резцы.

Подрезные резцы изготавливают с отогнутой и прямой державками (рис. 22). Хотя отогнутая державка усложняет изготовление резцов, она обеспечивает следующие преимущества: 1) универсальность, так как подрезные резцы могут работать напроход и на подрезание; 2) возможность вести обработку в менее доступных местах.

Расточные резцы используют для обработки внутренних сквозных и глухих отверстий, а также внутренних канавок. Из-за большого вылета державки, уменьшенной площади ее сечения и затрудненного отвода стружки расточные резцы работают в более тяжелых условиях, чем проходные резцы. Державки расточных резцов выполняют круглыми, а в месте крепления они имеют утолщение квадратного сечения. Диаметр державки зависит от диаметра обрабатываемого отверстия и равен $d_d = (0,5 \dots 0,8)d_o$, где d_o - диаметр обрабатываемого отверстия.

Расточные резцы имеют малую виброустойчивость и жесткость. Чтобы исключить трение задней поверхности резца и поверхности резания, лезвие резца располагают несколько ниже оси отверстия, а заднюю поверхность выполняют криволинейной формы.

Отрезные резцы применяют для отрезки заготовок из прутка и проточки наружных канавок в заготовках на токарных, револьверных станках и станках-автоматах.

Отрезные резцы применяются для отрезки заготовок из прутка и проточки наружных канавок. Эти резцы также работают в тяжелых условиях: большой вылет резца, затрудненные условия деформации металла при переходе

в стружку, малая жесткость режущей части и, следовательно, низкая виброустойчивость. Режущая часть имеет главную режущую кромку с главным углом в плане $\varphi=90^\circ$ и две вспомогательные режущие кромки с углами $\varphi_1=1^\circ30'...3^\circ$.

Если нужно обработать торец заготовки без оставления стержня (бобышки) в ее центре, то главную режущую кромку затачивают под углом $\varphi = 75...80^\circ$.

При использовании напайных твердосплавных режущих пластин длина главной режущей кромки отрезного резца должна быть не менее 5 мм. Для повышения жесткости в вертикальной плоскости головка резца обычно делается утолщенной, а режущая кромка во избежание отрыва твердосплавной пластины устанавливается ниже оси центров станка на расстоянии 0,5... 1,0 мм.

Передний угол γ оказывает большое влияние на виброустойчивость отрезных резцов, которая снижается с его уменьшением. Поэтому рекомендуется затачивать угол $\gamma = 15...20^\circ$ с упрочняющей фаской шириной $f= 0,2...0,3$ мм и под углом $\gamma_\phi= 0...-5^\circ$, задний угол $\alpha= 10... 12^\circ$.

Строгальные и долбежные резцы – это инструменты, работающие с ударной нагрузкой в момент периодически повторяющегося врезания. Из-за консольного крепления таких резцов со сравнительно большим вылетом их державки подвергаются упругим деформациям и вибрациям. Эти резцы работают со сниженными скоростями резания из-за больших инерционных масс и сечениями среза в 1,5...2 раза большими, чем при токарной обработке. По этим причинам условия резания неблагоприятны для использования твердосплавных пластин. Поэтому чаще всего эти резцы изготавливают из быстрорежущих сталей.

Во избежание внедрения задней поверхности строгального резца в обработанную поверхность заготовки из-за упругих деформаций державки его вершина должна быть расположена на одном уровне с опорной поверхностью, и поэтому державка имеет изогнутую форму.

Твердосплавные резцы - это резцы, оснащенные пластинами твердого сплава, обеспечивающие высокую производительность и получившие наибольшее распространение на практике.

Пластины крепятся к державке пайкой или механическим путем. Цельные твердосплавные резцы изготавливают только малых размеров (они применяются в приборостроении и часовой промышленности).

Использование пайки стандартных пластин из твердого сплава, имеющих разнообразную форму, позволяет получать компактные конструкции резцов. Последние после заточки имеют оптимальные значения геометрических параметров и характеризуются эффективным использованием твердого сплава благодаря многократной переточке.

Однако пайке присущ такой существенный недостаток, как появление внутренних термических напряжений в спае и в самих пластинах из-за большой разницы (примерно в 2 раза) коэффициентов линейного расширения твердого сплава и стальной державки. При охлаждении после пайки возникающие напряжения приводят к образованию микротрещин в пластинах, которые вскрываются при заточке или в процессе резания. Микротрещины приводят к

выкрашиванию и поломкам пластин. Обычно применяемые технологические приемы по снятию напряжений не решают полностью этой проблемы. Избавиться от напряжений можно только путем применения сменных многогранных пластин (СМП), которые механически крепятся к корпусу инструмента. По мере затупления пластин путем их поворота производится обновление режущих кромок, что обеспечивает их быстросменность и не требует переточек.

Инструменты, оснащенные СМП, по сравнению с напайными имеют следующие преимущества:

- 1) более высокая прочность, надежность и стойкость;
- 2) меньше расходы на смену и утилизацию пластин;
- 3) меньше простои оборудования при замене и наладке инструмента, что особенно важно при эксплуатации современных дорогостоящих станков с ЧПУ и автоматических линий;
- 4) более благоприятные условия для нанесения на пластины износостойких покрытий, что позволяет значительно (до 4...5 раз) повысить их стойкость, а следовательно, и производительность процесса резания;
- 5) меньше потери дефицитных материалов (вольфрама, кобальта, тантала и др.) за счет увеличения возврата пластин на переработку.

Недостатки инструментов, оснащенных СМП:

- 1) высокая стоимость из-за их высокой точности, а следовательно, высокой трудоемкости изготовления пластин и инструмента в целом;
- 2) повышенные габариты корпусов инструментов из-за необходимости размещения в них элементов крепления пластин;
- 3) невозможность полного обеспечения оптимальной геометрии режущей части инструмента из-за заданной формы пластин и условий их крепления.

По числу режущих кромок и форм пластины имеют различные исполнения, закрепленные в международных и национальных стандартах.

Геометрические параметры инструментов, оснащенных СМП, определяют в статике при изготовлении пластин и корректируют при их креплении в корпусе (державке) инструмента с учетом кинематики станка и условий резания.

По геометрическим параметрам СМП делятся на (рис. 24): а) негативные ($\gamma=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$); б) позитивные ($\gamma=0^\circ$, $\alpha>0^\circ$); в) негативно-позитивные ($\gamma>0^\circ$, $\alpha=0^\circ$).



Рис.24. Геометрические параметры СМП

Задний угол при установке негативных и негативно-позитивных пластин создается за счет их поворота при креплении в державке резца. При этом у негативных пластин передние углы становятся отрицательными, т.е. $(-\gamma) = \alpha$, у негативно-позитивных пластин угол γ уменьшается на величину угла α . У позитивных пластин угол γ равен углу поворота пластины по часовой стрелке, а угол α уменьшается на эту же величину.

Существует множество конструкций резцов, различающихся по способу крепления СМП, часть которых с целью удобства крепления изготавливают с отверстиями. Анализ многочисленных конструктивных решений крепления пластин позволил свести их к следующим схемам (рис. 25): а) прихватом сверху; б) рычагом через отверстие с прижатием к боковым стенкам гнезда; в) винтом с конической головкой; г) штифтом через отверстие и прихватом сверху.

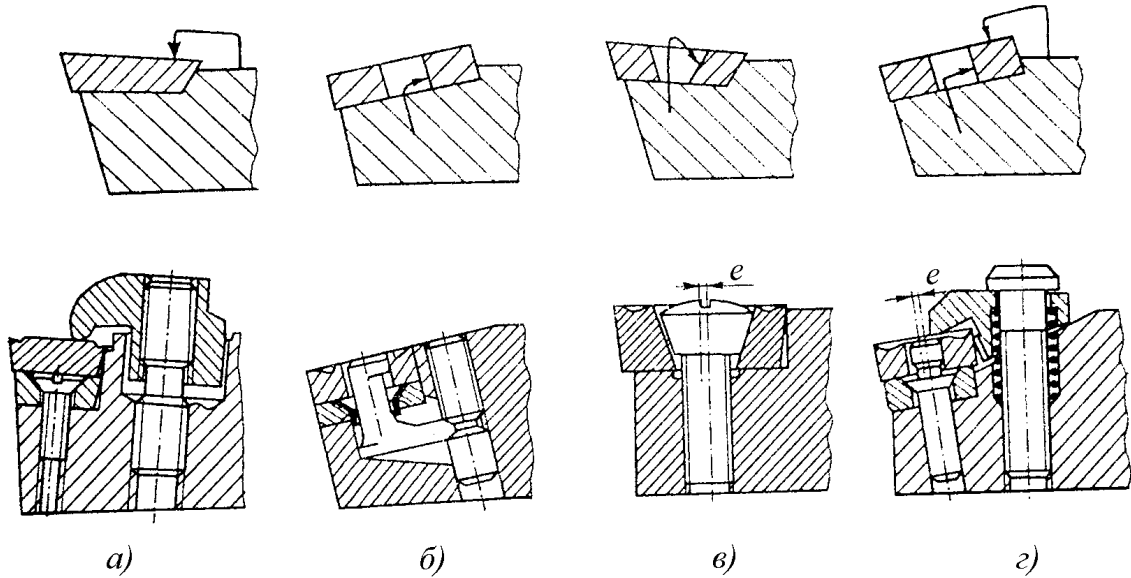


Рис.25. Схемы крепления СМП к телу резца

Пластины негативные и негативно-позитивные крепятся чаще всего прихватом сверху (схема *а*) или по схеме *г*. Последняя обеспечивает более надежное крепление. Крепление винтом (схема *в*) используется для малонагруженных пластин и является простым и компактным.

У резцов наибольшее распространение получили пластины с отверстием. Благодаря этому обеспечиваются свободный сход стружки по передней поверхности и значительно меньшие габариты элементов крепления, размещаемых в корпусе державки.

Возможны нестандартные схемы крепления твердосплавных пластин нестандартной формы. Примером этому являются отрезные резцы, разработанные фирмой «Sandvik Coromant» (Швеция), в которых крепление пластины осуществляется силами упругой деформации стенки паза державки.

Резцы, оснащенные керамикой и синтетическими сверхтвердыми материалами. Указанные материалы обладают высокими твердостью, износо- и теплостойкостью, благодаря чему обеспечивают значительное повышение производительности и стойкости, высокие точность и качество обработанной поверхности. Их недостатком является низкая прочность режущего клина, которая ограничивает область их применения. Наибольшую эффективность они показали при чистовом точении сталей, особенно закаленных, чугунов различной твердости и даже твердых сплавов с содержанием кобальта выше 25%. При этом обработка должна проводиться на высокоточных, жестких, скоростных и мощных станках с ЧПУ последнего поколения.

Поставляется режущая керамика в виде неперетачиваемых многогранных пластин (ГОСТ 25003-81) круглой, квадратной, треугольной и ромбической

форм различных размеров. Негативные керамические пластины крепятся в основном в тех же державках, что и твердосплавные, - прихватом сверху.

К группе сверхтвердых материалов, как уже отмечалось, относят алмазы (природные и синтетические) и композиты на основе поликристаллов кубического нитрида бора (эльбора).

Так как алмазы имеют очень малые размеры, то их крепление осуществляется пайкой, завальцовкой или механическим путем. Крепление алмаза пайкой осуществляется либо непосредственно в державку, либо с применением промежуточных вставок. В последнем варианте вставка прессуется и спекается вместе с алмазом методом порошковой металлургии. Механическое крепление алмаза осуществляется между металлическими пластинами с затяжкой их болтом.

Геометрические параметры заточки алмазных резцов: $\gamma = 0...-5^{\circ}$, $\alpha = 8... 12^{\circ}$, $\phi = 15...45^{\circ}$. Вершина резца в плане выполняется со скруглением $r = 0,2...0,8$ мм или с несколькими фасками. В сечении, нормальном к режущей кромке, радиус скругления режущего клина достигает величины $\rho < 1$ мкм. Благодаря этому алмазное точение позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности до $Ra 0,08...0,32$ мкм и повысить точность обработки до $IT 5...7$. При точении и растачивании цветных металлов, пластмасс и композиционных материалов стойкость алмазных резцов во много раз выше стойкости твердосплавных резцов. Алмазные резцы могут работать более 200...300 ч без подналадок и смены инструмента, что особенно важно для автоматизированного производства. При этом алмазы массой 0,5... 0,6 карата допускают 6...10 переточек.

При точении деталей из закаленных углеродистых сталей, легированных нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, а также высокопрочных чугунов применяются резцы, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) из кубического нитрида бора. В настоящее время промышленностью освоен выпуск таких пластин трехгранной, круглой, квадратной и ромбической форм небольших размеров с диаметром вписанной окружности $d = 4... 12,7$ мм, толщиной 3...5 мм ($\gamma = 0$, $\alpha = 0...11^{\circ}$). Крепление таких пластин осуществляется прихватом сверху.

В последние годы стали применяться двухслойные пластины, которые представляют собой твердосплавную пластину с нанесенным слоем поликристаллов кубического нитрида бора на ее наружной поверхности или с напайками по ее углам. Такие пластины имеют более крупные размеры и их можно крепить механическим путем в державках, применяемых для крепления твердосплавных пластин.

СПОСОБЫ СТРУЖКОЗАВИВАНИЯ И СТРУЖКОЛОМАНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ

Для получения транспортабельной формы стружки в виде отдельных кусочков, сегментов, колец, коротких завитков или сплошной пружины применяют специальные способы **стружкозавивания** и **стружколомания**. Обычно для этого на передней поверхности резца на пути сходящей стружки создают специальные препятствия в виде лунок, канавок, сферических выступов

или углублений вдоль режущей кромки, а также накладных нерегулируемых уступов и регулируемых стружколомов.

Лунки (рис.26, а) и уступы (рис.26, б), применяемые на черновых и получистовых операциях, получают путем вышлифовывания алмазными кругами у проходных резцов с напайными твердосплавными пластинами. К сожалению, они не универсальны, так как для каждого обрабатываемого материала и определенного режима резания требуется определять опытным путем их параметры f , r , a , b и др., обеспечивающие нужную форму стружки.

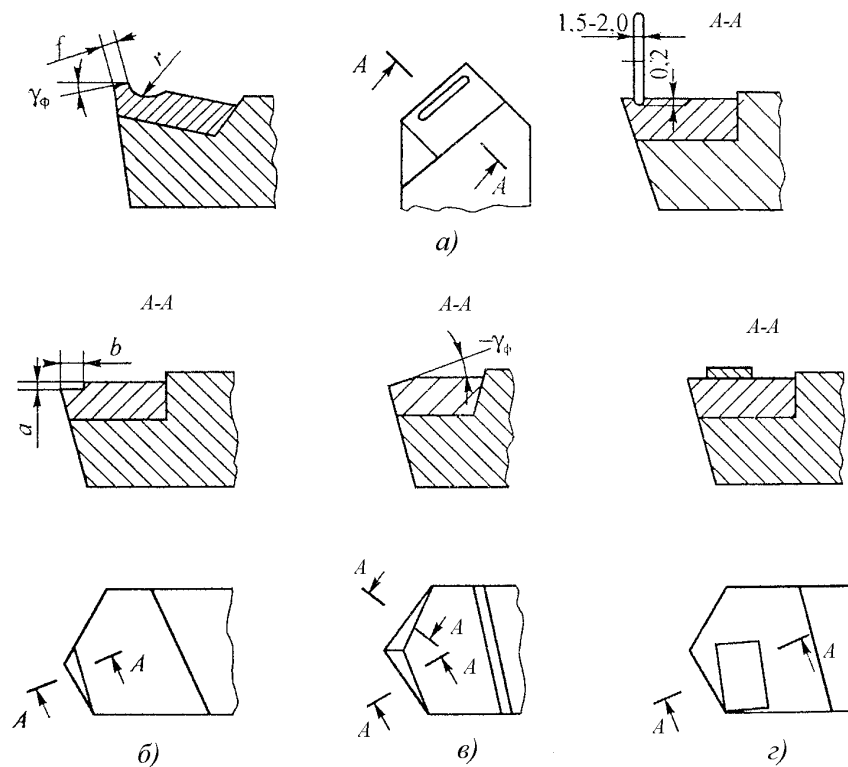


Рис. 26. Способы стружкозаивания и стружколомания: а) – лунки; б) – уступ; в) – фаски с $\gamma_{\phi} < 0$; г) – накладной нерегулируемый стружколом.

Хорошо показала себя заточка фасок переменной ширины вдоль главной и вспомогательной режущих кромок с отрицательным передним углом (рис.26, в). Ребро, образующееся при их пересечении, обеспечивает надежное дробление стружки при точении высоколегированных сталей, но несколько снижает стойкость резца.

Накладные стружколомающие элементы используются двух типов: нерегулируемые и регулируемые. Первые выполняются в виде пластины, напайваемой сверху режущей пластины. В отличие от лунок и уступов, такой стружколом не снижает прочности режущей пластины, но требует предварительного экспериментального определения положения относительно главной режущей кромки. При переточке резцов необходима перепайка накладной пластины, что неудобно, поэтому такие стружколомы применяются крайне редко.

Накладные регулируемые стружколомы представляют собой самостоятельные устройства, закрепляемые на суппорте станка. Их рабочая часть выполняется в виде напайной твердосплавной пластины-уступа, устанавливаемой в определенном положении относительно режущей кромки,

которое обеспечивает надежное дробление или завивание стружки. Устройство позволяет регулировать положение такого уступа относительно режущей кромки при смене режимов резания. Недостатком уступа является сложность и громоздкость конструкции, ухудшающие условия отвода стружки.

У резцов, оснащенных СМП, стружколомающие канавки и уступы получают методом прессования. При этом форма передней поверхности принимает порой экзотический вид с использованием лунок, канавок и уступов переменной глубины, высоты и ширины. Здесь эффект стружкодробления достигается как за счет изменения ширины площади контакта стружки с передней поверхностью резца, так и за счет силового воздействия на сходящуюся стружку. Кроме того, эффект усиливается за счет изменения по длине режущей кромки условий контакта стружки с передней поверхностью резца и улучшения условий подвода СОЖ в область контакта.

В автоматизированном производстве применяют также кинематический способ дробления стружки, заключающийся в использовании принудительных колебаний резца в направлении подачи. При этом толщина стружки меняется и стружка распадается на отдельные кусочки. Следует отметить, что этот метод несколько снижает стойкость инструмента и требует применения специальных устройств, встраиваемых в механизм подачи станка, что усложняет конструкцию последнего.

ФАСОННЫЕ РЕЗЦЫ

Эти резцы применяются для обработки тел вращения, имеющих наружные или внутренние фасонные поверхности. Обработка этими резцами обычно ведется на станках-автоматах и револьверных станках в условиях крупносерийного или массового типа производства. В качестве заготовок деталей чаще всего используют калиброванный прокат в виде прутка.

В сравнении с другими типами резцов фасонные резцы имеют следующие преимущества:

- 1) обеспечивают идентичность формы детали и высокую точность размеров, не зависящую от квалификации рабочего;
- 2) обладают высокой производительностью за счет большой длины активной части режущей кромки;
- 3) имеют большой запас на переточку;
- 4) для них достаточно простой переточки по плоскости передней грани;
- 5) не требуют больших затрат времени на наладку и настройку станка.

К числу недостатков фасонных резцов можно отнести:

- 1) сложность изготовления и высокую стоимость;
- 2) это резцы специальные, так как они пригодны для изготовления деталей только заданного профиля;
- 3) большие радиальные нагрузки у резцов, работающих с радиальной подачей, вызывают вибрации и упругие деформации нежестких заготовок, что требует снижения подачи и уменьшает производительность;
- 4) кинематические передние и задние углы фасонных резцов в процессе резания меняются по длине режущих кромок в большом диапазоне, существенно отличаясь от оптимальных значений.

Основные типы фасонных резцов: стержневые, круглые, призматические радиальные, тангенциальные. Из них наибольшее применение нашли **круглые и призматические резцы**, работающие с радиальной подачей.

Стержневые резцы подобны призматическим, но имеют малый запас на переточку. Они применяются в основном для затылования фрез, а также для нарезания резьбы. Крепление этих резцов в суппорте станка подобно креплению токарных резцов.

Призматические тангенциальные резцы позволяют обрабатывать детали малой жесткости, но требуют специальных станков и поэтому на практике применяются очень редко. Их недостатком также является переменность передних и задних углов в процессе снятия припуска.

Сравнение круглых и призматических резцов, работающих с радиальной подачей, показывает, что круглые резцы более технологичны и могут быть изготовлены с большей точностью. Однако они обладают меньшим запасом на переточку и меньшей жесткостью крепления, так как у насадных резцов диаметр оправки зависит от диаметра резца. Последний рекомендуется брать не более 100 мм из-за ухудшения качества быстрорежущей стали, используемой для изготовления таких резцов. Призматические резцы имеют большую жесткость и крепятся с помощью ласточкина хвоста в державках стержневого типа, обладают большим запасом на переточку и обеспечивают большую точность обработки.

Для обработки внутренних фасонных поверхностей используются только круглые фасонные резцы с креплением на станке с помощью хвостовика, выполненного за одно целое с резцом.

ОСЕВОЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Осевые инструменты – это тела вращения в основном цилиндрической формы, имеющие на образующей 2 или более режущих кромок/ленточек. Для осевого инструмента, как правило, реализуется следующая схема резания, – совмещается вращательное движение инструмента с его поступательным перемещением вдоль оси неподвижной/подвижной заготовки. К осевым инструментам относятся сверла, зенкеры, зенковки, развертки.

Сверла - это осевые режущие инструменты, предназначенные для образования отверстий в сплошном материале, а также для обработки отверстий, предварительно изготовленных ковкой, штамповкой, литьем или сверлением.

Кинематика процесса сверления состоит из двух движений: главного - вращательного вокруг оси инструмента (заготовки) и поступательного - движения подачи вдоль той же оси.

По конструктивному исполнению сверла делятся на три основных типа: 1) перовые (лопаточные); 2) спиральные (с винтовыми канавками); 3) специальные (для сверления глубоких отверстий, кольцевые, комбинированные и др.).

В качестве материала рабочей части в основном используются быстрорежущие стали и прежде всего сталь марки Р6М5. В последние годы в нашей стране и особенно за рубежом в больших объемах выпускаются различные конструкции сверл, оснащенных твердосплавными пластинами.

Зенкеры - это осевые многолезвийные режущие инструменты, которые применяются для промежуточной или окончательной обработки отверстий, полученных предварительно сверлением, литьем, ковкой или штамповкой, с целью повышения их точности до JT11... JT10 и уменьшения шероховатости обработанной поверхности до Ra 40... 10 мкм.

Зенкеры получили широкое распространение в массовом и крупносерийном производствах. По сравнению с расточными резцами они, являясь мерными инструментами, не требуют настройки на размер, что обеспечивает сокращение вспомогательного времени и повышает точность отверстий.

Кинематика рабочих движений зенкеров подобна сверлам. Однако по сравнению с последними зенкеры обеспечивают большие производительность обработки отверстий и точность, так как снимают меньшие припуски ($t = 1,5...4,0$ мм, $d = 18...80$ мм), имеют большее число режущих кромок ($z = 3...4$) и направляющих ленточек. Из-за малой глубины стружечных канавок они имеют большую, чем сверла, жесткость, а отсутствие поперечной кромки позволяет вести обработку с более высокими подачами.

Развертки - это осевые многолезвийные режущие инструменты применяемые для чистовой обработки отверстий. Точность отверстий после развертывания составляет JT8...JT6, а шероховатость поверхности - Ra 1,25...0,32 мкм. При этом наилучшие результаты достигаются в случае двукратного развертывания, когда первая развертка снимает $2/3$ припуска, а вторая - оставшуюся $1/3$. Такие же показатели можно получить и при шлифовании, однако после развертывания качество обработанной поверхности выше, так как на шлифованной поверхности остаются частицы абразива, которые приводят к ускоренному износу сопрягаемых деталей.

Кинематика рабочих движений при развертывании подобна сверлению и зенкерованию. В отличие от зенкеров, развертки имеют большее число зубьев ($z = 6, \dots, 14$) и, как следствие, лучшее направление в отверстии. Они снимают значительно меньший припуск ($t = 0,15 \dots 0,50$ мм), чем при зенкеровании. С целью достижения минимальной шероховатости поверхности развертки при обработке сталей работают на низких скоростях резания ($v = 4 \dots 12$ м/мин), т.е. до области появления нароста. Тем не менее, благодаря большому числу зубьев производительность при развертывании достаточно высока.

СВЕРЛА ПЕРОВЫЕ

Перовые сверла известны с древних времен. Так, например, в археологических раскопках были найдены их прототипы в виде лопатки из твердого материала, заостренной на конце и предназначенной для сверления вручную отверстий в более мягких материалах. Со времени появления металлообработки перовые сверла постоянно совершенствовались, сейчас существуют цельные перовые сверла, сборные, с внутренним напорным охлаждением и для сверления ступенчатых отверстий.

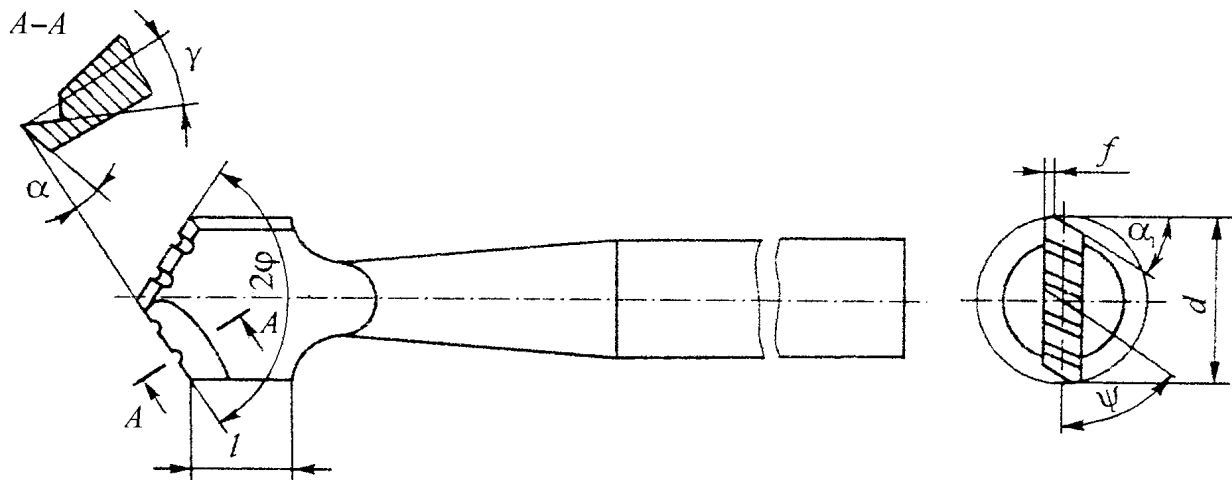


Рис. 27. Цельное перовое сверло

Цельные перовые сверла (рис. 27) изготавливают из прутка путем ковки или фрезерования режущей части в форме пластины, которая затачивается на конус под углом $2\phi = 118^\circ$. При этом образуются две главные и две вспомогательные режущие кромки. Заточкой двух плоских задних поверхностей создается задний угол $\alpha = 10 \dots 12^\circ$. При пересечении этих поверхностей образуется поперечная режущая кромка (перемычка). Если передние поверхности плоские, то передние углы на главных режущих кромках имеют отрицательные значения, что нежелательно из-за возрастания силовой нагрузки на сверло и появления вибраций.

Для улучшения процесса резания производится подточка передней поверхности сверла под углом $\gamma = 5 \dots 10^\circ$, которая, однако, ослабляет прочность режущего клина. Для уменьшения трения на вспомогательных кромках затачивается задний угол $\alpha_1 = 5 \dots 8^\circ$, для лучшего направления сверла в отверстии оставляем узкие цилиндрические фаски шириной $f = 0,2 \dots 0,5$ мм по всей длине режущей части.

Достоинствами перовых сверл являются простота конструкции, а также возможность изготовления их любого диаметра и длины даже в условиях ремонтных мастерских.

К недостаткам перовых сверл можно отнести: 1) затрудненные условия отвода стружки; 2) склонность к вибрациям из-за малой жесткости режущей части; 3) небольшой запас на переточку; 4) низкую производительность процесса сверления из-за малых значений подачи и, в связи с этим, необходимость периодического вывода сверла из отверстия для освобождения от стружки.

Ступенчатое перовое сверло применяется для сверления неглубоких ступенчатых отверстий на станках-автоматах. Оно позволяет сократить число операций и, следовательно, инструментов. Сборное перовое сверло конструируется со сменной режущей пластиной, закрепляемой в стержне любой длины. Для улучшения отвода стружки предусматривается ее деление по ширине с помощью стружкодробящих канавок на задних поверхностях. Через патрон и отверстие в стержне можно подавать под давлением СОЖ, которая одновременно с отводом тепла из зоны резания вымывает стружку из отверстия.

Набор быстросменных пластин, разных по диаметру, позволяет сократить номенклатуру сверл и расходы на их изготовление. Такие сверла в последние годы стали широко применять на многооперационных станках с ЧПУ, главным образом при рассверливании отверстий.

СВЕРЛА СПИРАЛЬНЫЕ

Спиральные или, правильнее, винтовые, сверла были впервые показаны на Всемирной торговой выставке в 1867 г. американской фирмой Морзе. До настоящего времени основные особенности их конструкции сохранились практически неизменными.

Основные конструктивные элементы и геометрические параметры спиральных сверл показаны на рис. 28. На конической режущей части с углом 2φ при вершине расположены две главные режущие кромки – линии пересечения винтовых передних и задних поверхностей. Форма задних поверхностей определяется методом заточки. В результате пересечения двух задних поверхностей образуется поперечная режущая кромка, наклоненная к главной режущей кромке под углом ψ . Эта кромка называется перемычкой и располагается на сердцевине сверла с условным диаметром $d_0 = (0,15...0,25)d$, где d - диаметр сверла. За рабочей частью сверла следует шейка, которая используется для нанесения маркировки сверла: диаметра, материала режущей части, товарного знака завода-изготовителя. Затем идет лапка, которая служит для извлечения (выбивания) сверла из конического отверстия шпинделя.

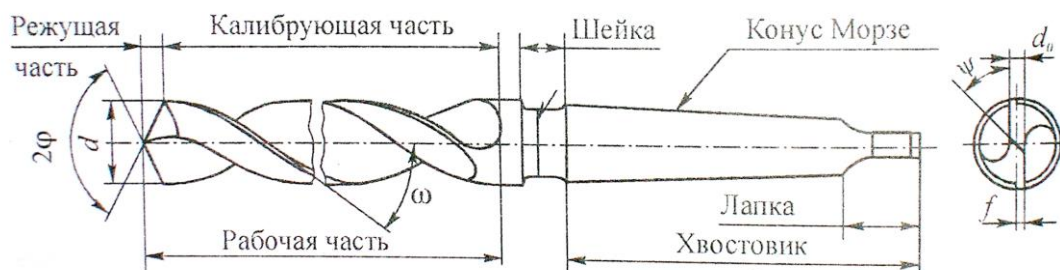


Рис. 28. Основные конструктивные элементы спирального сверла

Из всех известных конструкций сверл спиральные сверла нашли наибольшее применение благодаря следующим достоинствам: 1) хороший отвод стружки из обрабатываемого отверстия из-за наличия винтовых канавок; 2) положительные передние углы на всей длине главных режущих кромок; 3) большой запас на переточку, которая производится по задним поверхностям и может выполняться вручную или на специальных заточных станках, в том числе станках-автоматах; 4) хорошее направление сверла в отверстии из-за наличия калибрующих ленточек на наружной поверхности калибрующей части инструмента.

Производство спиральных сверл осуществляется в специализированных цехах или заводах в условиях крупносерийного или массового производства. Поэтому, несмотря на сложное конструктивное исполнение, себестоимость этих сверл невелика.

Режущая и калибрующая части сверла составляют его рабочую часть (рис. 28), по длине которой сверла делятся на короткую, среднюю и длинную серии. Стандартные спиральные сверла изготавливают диаметром 0,1...80 мм с допусками по h8...h9.

Хвостовики бывают двух типов: конические (типа Морзе) с лапкой на конце для сверл $d = 6...80$ мм и цилиндрические - для сверл $d = 0,1...20$ мм. У сверл $d > 8$ мм хвостовики делают из конструкционной стали 45 или 40Х, свариваемой с рабочей частью. Для увеличения силы трения в месте крепления сверла в патроне и возможности правки сверл по длине хвостовики термически не обрабатывают. Лапки сверл для упрочнения закаливают, так как они используются для выбивания сверл из отверстия шпинделя станка или из переходной втулки, как уже говорилось.

Геометрические параметры спиральных сверл. Спиральные сверла имеют сложную геометрию режущей части, что объясняется наличием большого числа кромок и сложных по конфигурации передних и задних поверхностей.

К числу геометрических параметров спирального сверла относятся:

Угол при вершине 2ϕ , который играет роль главного угла в плане. Угол 2ϕ образуется главными режущими кромками и имеет существенное значение для процесса сверления: от величины этого угла зависит величина переднего и заднего углов, а также формы режущей кромки. У стандартных сверл $2\phi = 116...120^\circ$. При этом главные режущие кромки строго прямолинейны и совпадают с линейной образующей винтовой передней поверхности. При заточке сверл угол заточки ($2\phi_{\text{зат}} \neq 2\phi$) может быть изменен в пределах от 70 до 135° . При этом режущие кромки становятся криволинейными, меняются соотношение ширины и толщины срезаемой стружки, а также величины передних углов на главных режущих кромках. Соответственно меняются степень деформации срезаемого припуска, силы и температура резания и условия отвода стружки.

На основании производственного опыта оптимальное значение угла 2ϕ рекомендуется брать в зависимости от обрабатываемого материала, например, при обработке конструкционных сталей $2\phi = 116...120^\circ$, нержавеющей и высокопрочных сталей $2\phi = 125...150^\circ$, чугуна, бронзы $2\phi = 90...100^\circ$, чугуна

высокой твердости $2\phi = 120...125^\circ$, цветных металлов (алюминиевые сплавы, латунь, медь) $2\phi = 125...140^\circ$.

Угол наклона винтовой канавки ω , замеренный на наружном диаметре сверла, является одним из важнейших параметров, определяющих величину передних углов в каждой точке главных режущих кромок. У стандартных сверл этот угол назначается в зависимости от их диаметра: $\omega = 25...28^\circ$ для $d < 10$ мм и $\omega = 28...32^\circ$ для $d > 10$ мм. Так как этот угол оказывает также большое влияние на отвод стружки из зоны резания, то у специальных спиральных сверл его увеличивают до $40...60^\circ$. Однако с увеличением угла ω снижается поперечная жесткость сверл, увеличиваются значения передних углов, особенно на периферийных участках режущих кромок, что может сильно ослабить прочность режущего клина и снизить стойкость сверл. В этом случае выполняют подточку передней поверхности с целью уменьшения углов γ .

При проектировании новых конструкций сверл для обработки определенных видов материалов по рекомендациям *ISO* значение ω при обработке сталей следует брать равным $25...35^\circ$, чугунов и других хрупких материалов - $10...15^\circ$, алюминия, меди и других вязких легкообрабатываемых материалов - $35...45^\circ$.

Углы режущей кромки. Сверло так же, как и резец, имеет следующие основные углы режущих кромок (рис. 29).

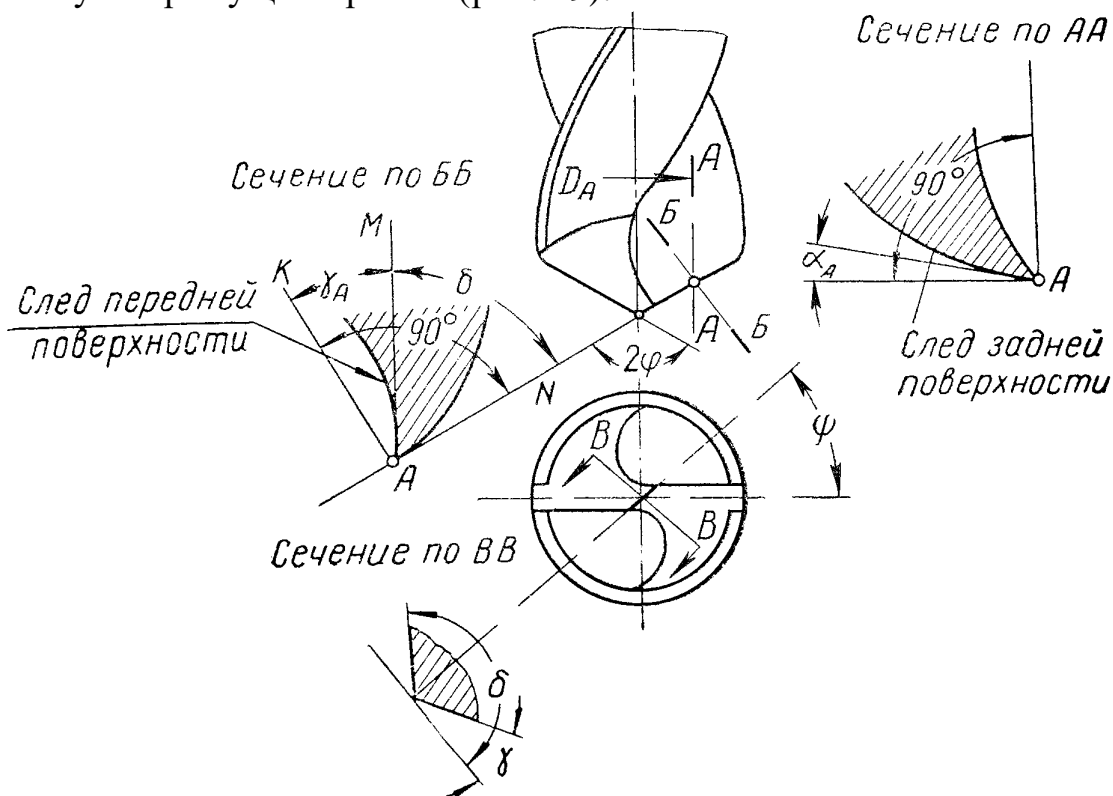


Рис. 29. Основные углы сверла

Передний угол измеряется в плоскости, нормальной к главной режущей кромке (плоскость ББ).

Как видно из рис. 29, передний угол образован касательной AM к передней поверхности в рассматриваемой точке A на режущей кромке и линией AK , перпендикулярной к поверхности резания в той же точке.

Для различных точек режущей кромки передний угол есть величина переменная. Если у периферии сверла на наружном диаметре передний

угол имеет наибольшее значение $\gamma=25-30^\circ$, то по мере приближения к вершине сверла он уменьшается, достигая у вершины величины, близкой к нулю.

Передний угол γ_A в любой точке A режущей кромки (фиг. 29) может быть определен в зависимости от угла наклона винтовой канавки ω , половина угла при вершине φ и диаметре D_A , на котором расположена точка A , по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma_A = \frac{D_A \operatorname{tg} \omega}{D \cdot \operatorname{Sin} \varphi},$$

где D — диаметр сверла в мм.

Изменение переднего угла в различных точках режущей кромки показано на рис. 30: чем ближе к центру расположена точка режущей кромки, тем меньше передний угол γ , и наоборот.

Угол резания сверла δ (рис. 29) представляет собой угол между прямыми AM и AN ; наименьшее значение угла — у периферии сверла и наибольшее — у сердцевины. Угол резания у поперечной кромки (сечение BB) достигает величины $130-150^\circ$. Большие углы резания у поперечной кромки, а также и в точках главных режущих кромок, близко лежащих к оси сверла, создают неблагоприятные условия резания у сердцевины сверла.

Задний угол α измеряется в плоскости AA , касательной к цилиндрической поверхности, ось которой совпадает с осью сверла (рис. 29). Задний угол образован касательной к задней поверхности в рассматриваемой точке A на режущей кромке и касательной в той же точке к поверхности резания. Задние углы у сверла различны для различных точек режущей кромки. Если в крайней точке наружного диаметра задний угол $\alpha = 8-10^\circ$, то у оси сверла этот угол должен быть равен $\alpha = 20-26^\circ$ (фиг. 30). При соблюдении указанных значений переднего γ и заднего α углов угол заострения имеет примерно одинаковое значение вдоль всей длины главной режущей кромки сверла.

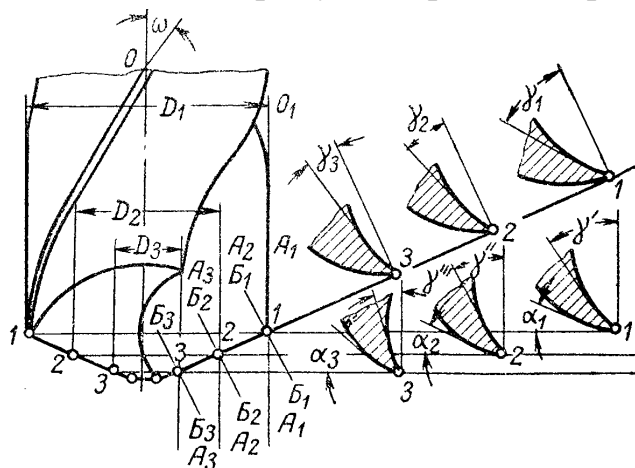


Рис. 30. Изменение переднего и заднего углов в различных точках режущей кромки сверла

Поперечная кромка и перемычка. Главные режущие кромки сверла имеют смещение относительно центра сверла, в результате чего у вершины сверла образуется поперечная кромка/перемычка (рис. 29).

У сверл из инструментальной стали с фрезерованными канавками толщина сердцевины (перемычки) составляет $(0,13 - 0,25)D$. Меньшее значение

выбирается для сверл большего диаметра. Для сверл, оснащенных пластинками твердого сплава, толщина перемычки равна $(0,27 - 0,3)D$.

Для повышения жесткости сверла толщина сердцевины увеличивается по направлению к хвостовику на 1,4—1,8 мм на каждые 100 мм длины; для сверл с крутыми винтовыми канавками при $\omega = 60^\circ$ утолщение сердцевины составляет 2—4,5 мм.

Витые сверла, канавки которых образуются не фрезерованием, а прокаткой, имеют по всей длине рабочей части одинаковую толщину перемычки.

Угол наклона поперечной кромки ψ есть острый угол, между проекциями поперечной кромки и главных режущих кромок на плоскость, перпендикулярную к оси сверла (рис. 28, 29). Для сверл диаметром от 0,25 до 15 мм $\psi = 50^\circ$ и для сверл диаметром от 15 до 80 мм $\psi = 55^\circ$.

Ленточка сверла. Для снижения трения калибрующих ленточек о стенки отверстия их ширину в зависимости от диаметра сверла принимают равной $f = (0,32...0,45)\sqrt{d}$, а высоту $\Delta = 0,1...0,3$ мм. Во избежание защемления сверла в отверстии предусматривается уменьшение его диаметра к хвостовику – **обратная конусность**, равная 0,03...0,12 мм на 100 мм длины рабочей части. У сердцевины сверла с целью повышения его прочности и жесткости предусматривается прямая конусность, т.е. увеличение ее диаметра в направлении к хвостовику, равное 1,4... 1,7 мм на 100 мм длины.

Уменьшение диаметра сверла, из-за обратной конусности, при переточках не оказывает заметного влияния на диаметр отверстия, так как сверло несколько разбивает отверстие, что компенсирует уменьшение размера.

Недостатки геометрии спиральных сверл и способы ее улучшения при заточке

К числу основных недостатков геометрии стандартных спиральных сверл, снижающих их стойкость и производительность, можно отнести:

- 1) наличие нулевых задних углов на вспомогательных режущих кромках;
- 2) отрицательные значения передних углов на поперечной режущей кромке;
- 3) большие передние углы на периферийных участках главных режущих кромок.

Для уменьшения влияния этих недостатков на практике широко пользуются следующими способами:

1. Делают подточку ленточки путем создания на вспомогательных кромках задних углов $\alpha_1 = 6...8^\circ$, оставляя небольшую фаску шириной $f = 0,3...0,1$ мм на длине $l = (0,1...0,2)d$, чтобы не ухудшить направление сверла в отверстии (рис. 31). Благодаря этому снижается сила трения на ленточках, а при сверлении сталей на них предотвращается налипание мелкой стружки, что приводит к повышению стойкости инструмента.

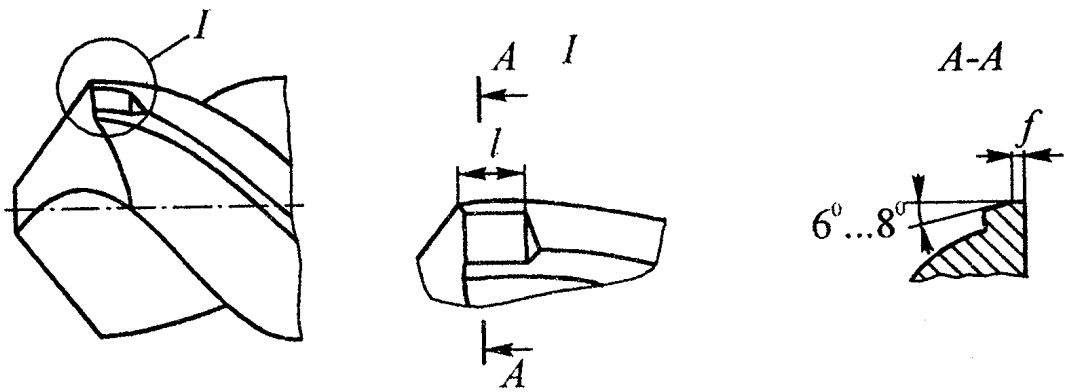


Рис. 31. Подточка ленточки сверла

2. Применяют различные способы подточки поперечной режущей кромки (рис. 32), снижающие осевую составляющую силы резания, улучшающие условия засверливания и увеличивающие производительность процесса сверления за счет увеличения подачи. Рекомендуемое отдельными авторами перерезание поперечной кромки с образованием новых полукромки приводит к ослаблению и разрушению центра сверла. Оно применимо лишь при сверлении чугунов и обеспечивает снижение осевой силы до 50%. За счет этого возможно значительное увеличение подачи.

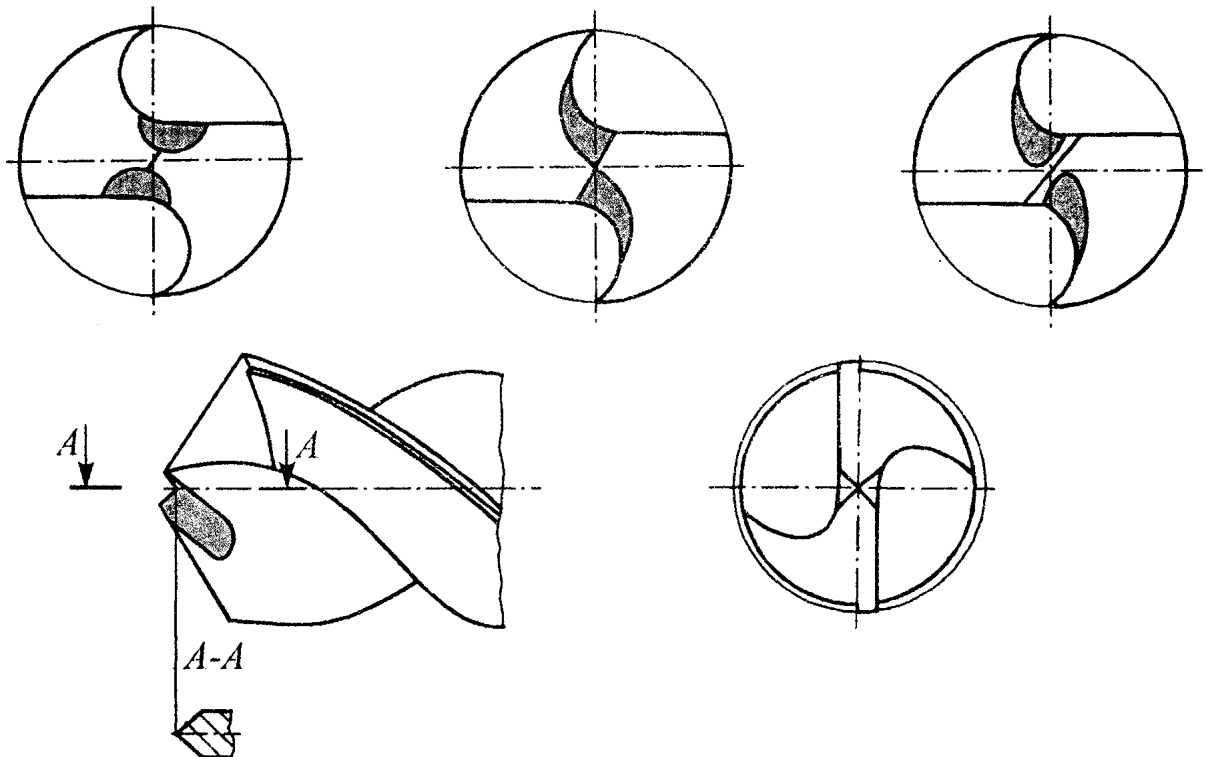


Рис. 32. Различные варианты подточки перемычки сверла

3. Двойная заточка сверл (рис. 33). При этом $2\varphi = 116^\circ$, а $2\varphi_1 = 70 \dots 90^\circ$, с шириной дополнительной заточки по уголкам $b = (0,1 \dots 0,2)d$. Благодаря этому уменьшается износ наиболее уязвимых периферийных участков режущих кромок сверла, где скорость резания наибольшая, а передние углы меньше на $7 \dots 8^\circ$. При этом за счет уменьшения угла φ увеличивается ширина и соответственно, уменьшается толщина срезаемой стружки, улучшается теплоотвод. В итоге в сочетании с подточкой поперечной режущей кромки

двойная заточка обеспечивает при сверлении конструкционных сталей повышение стойкости сверл в 3...4 раза.

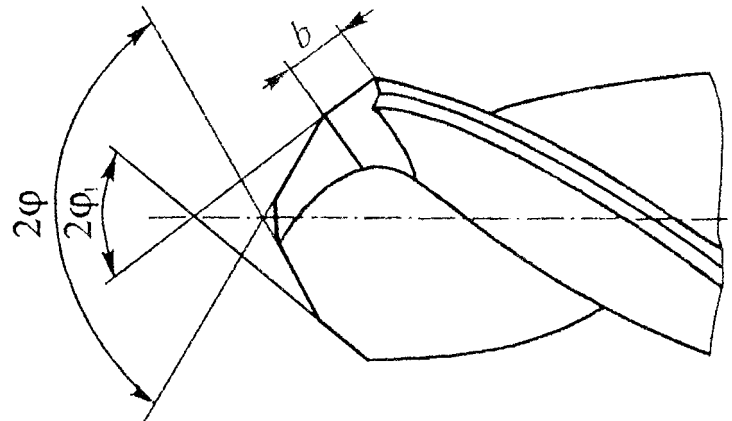


Рис. 33. Двойная заточка сверла

На практике применяются и другие способы дополнительной заточки режущей части сверл, используемой с целью повышения их стойкости.

ЗЕНКЕРЫ

Зенкеры классифицируют по следующим признакам:

а) вид обработки – цилиндрические зенкеры (применяются для увеличения диаметра отверстий (рис. 34, а), зенковки (применяются для обработки цилиндрических или конических углублений под головки болтов, винтов, а также для снятия фасок (рис. 34, б, в), подрезки торцов бобышек и приливов на корпусных деталях (рис. 34, г));

б) способ крепления зенкера – хвостовые (с цилиндрическим и коническим хвостовиками ($d = 10...40$ мм, $z = 3$)) и насадные ($d = 32...80$ мм, $z = 4$);

в) конструкция зенкера – цельные, сборные (со вставными ножами, $d = 40... 120$ мм) и регулируемые по диаметру;

г) вид режущего материала – быстрорежущие и твердосплавные.

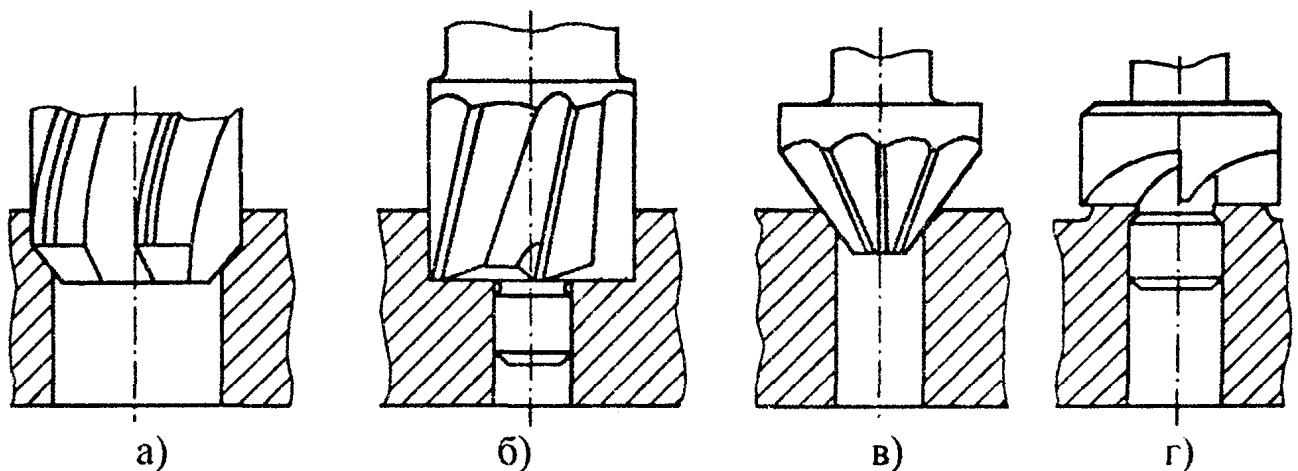


Рис. 34. Типы зенкеров: а) – цилиндрический зенкер; б, в, г – зенковки.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЗЕНКЕРЫ

Цилиндрические зенкеры получили наибольшее распространение в механообработке. Они могут быть хвостовыми (рис. 35) и насадными (рис. 36). К **основным конструктивным элементам зенкеров относятся:** режущая часть (заборный конус), калибрующая часть, число канавок (зубьев), форма канавок, крепежная часть. К **геометрическим параметрам относятся:** угол при вершине 2φ , передние γ и задние α углы, углы наклона канавок ω и главных режущих кромок λ .

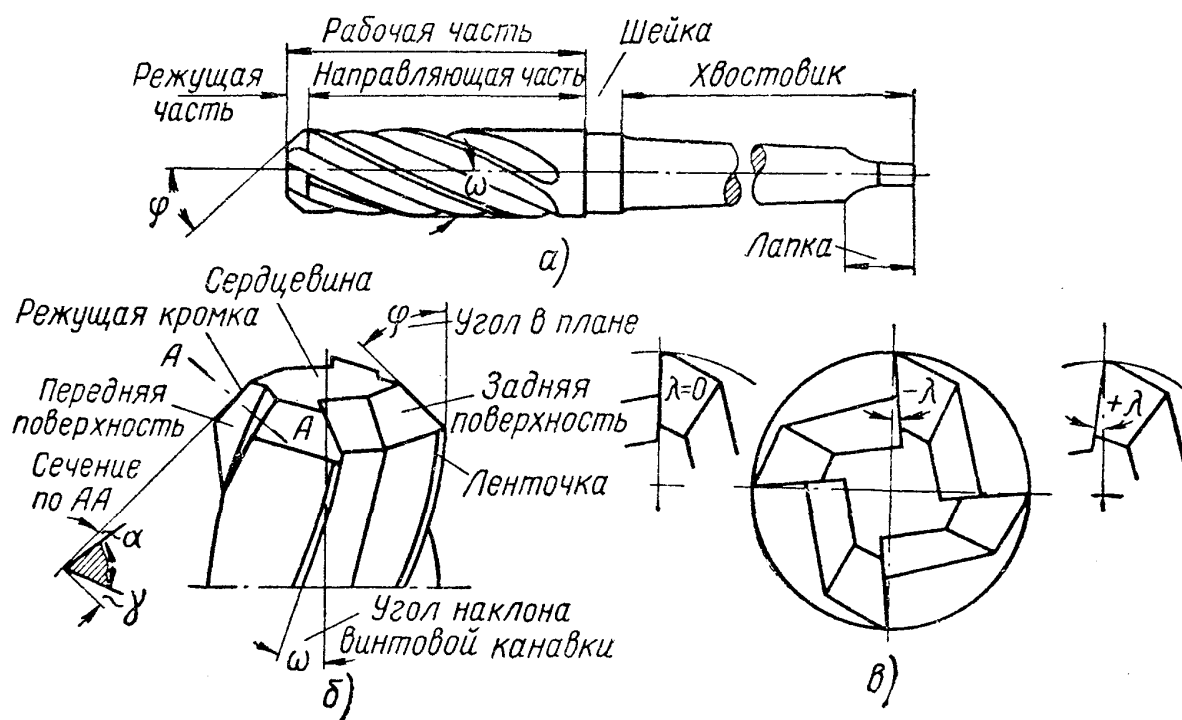


Рис. 35. Части и элементы цилиндрического зенкера с коническим хвостовиком

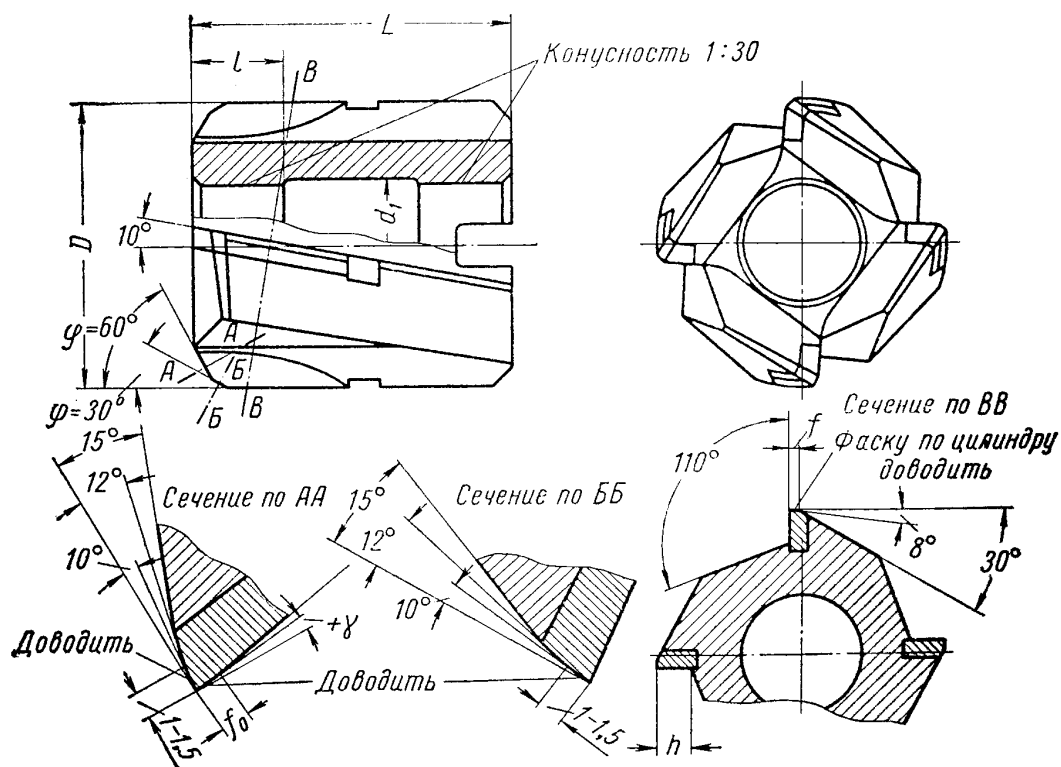


Рис. 36. Насадной зенкер, оснащенный твердым сплавом

Зенкер по своей конструкции имеет сходство со спиральным сверлом с той разницей, что режущие кромки не доходят до оси инструмента, в результате чего на зенкере отсутствует поперечная режущая кромка. Это дает возможность уменьшить глубину канавки и соответственно увеличить жесткость инструмента.

Цилиндрический зенкер (рис. 35, а, б) состоит из рабочей части, шейки и хвостовика.

Рабочая часть состоит из режущей части и направляющей части.

Режущая часть зенкера выполняет основную работу резания с помощью режущих кромок, расположенных под углом $\phi = 45 \div 60^\circ$.

Направляющая часть обеспечивает направление зенкера и дает окончательный размер отверстия по диаметру.

Калибрующая часть зенкера обеспечивает необходимую точность размера отверстия, направляет зенкер в процессе обработки отверстия и служит запасом на его переточку. На ней расположены цилиндрические ленточки шириной $f = 0,8 \dots 2,0$ мм для $d = 10 \dots 80$ мм. Радиальное биение ленточек должно быть не более $0,04 \dots 0,06$ мм.

Для снижения трения и исключения возможности защемления в отверстии у зенкера предусматривается обратная конусность по ленточкам в пределах $0,04 \dots 0,10$ мм на 100 мм длины в зависимости от диаметра инструмента. У твердосплавных зенкеров уменьшение диаметра задается в пределах $0,05 \dots 0,08$ мм на длине режущей пластины, а диаметр корпуса инструмента занижается на $0,01 \dots 0,02$ мм по отношению к размеру конца твердосплавной пластины.

Увеличение ширины ленточек твердосплавных зенкеров нецелесообразно, так как оно сопровождается налипанием на них мелкой стружки и приводит к снижению стойкости инструмента. При увеличении обратной конусности наблюдаются вибрации, и происходит быстрая потеря размера зенкера при его переточке.

Зенкеры с коническим хвостовиком изготавливаются диаметром 10 – 32 мм с тремя режущими зубьями; насадные зенкеры имеют обычно четыре зуба и изготавливаются для диаметров от 25 до 80 мм (рис. 36).

Угол при вершине 2ϕ является важным элементом зенкера и выбирается в пределах $90 - 120^\circ$.

Для увеличения стойкости зенкера применяют двойную заточку, вводя дополнительный вспомогательный угол в плане $\phi_1 \approx 0,5\phi$, который образует переходную режущую кромку на длине 1 – 2 мм. Длина режущей кромки берется примерно в 2 раза больше глубины резания t . При обработке глухих отверстий с плоским дном угол в плане ϕ равен 90° .

Угол наклона винтовых канавок ω оказывает существенное влияние на передний угол и процесс резания. Поэтому значение угла ω выбирается с учетом механических свойств обрабатываемого материала. Для обработки мягкой стали и алюминиевых сплавов $\omega = 25-30^\circ$, для твердой стали $\omega = 15-20^\circ$, для чугуна и бронзы $\omega = 10^\circ$.

Так как с увеличением угла ω понижается жесткость зенкера, то для малых диаметров угол ω желательно брать меньше.

Положение режущей кромки в плоскости, перпендикулярной к оси зенкера, определяется углом λ . Этот угол наклона режущей кромки расположен между

главной режущей кромкой зуба и осевой плоскостью, проходящей через вершину зуба. При расположении вершины зубьев ниже остальных точек режущей кромки угол λ положительный, выше – отрицательный (рис. 35, в).

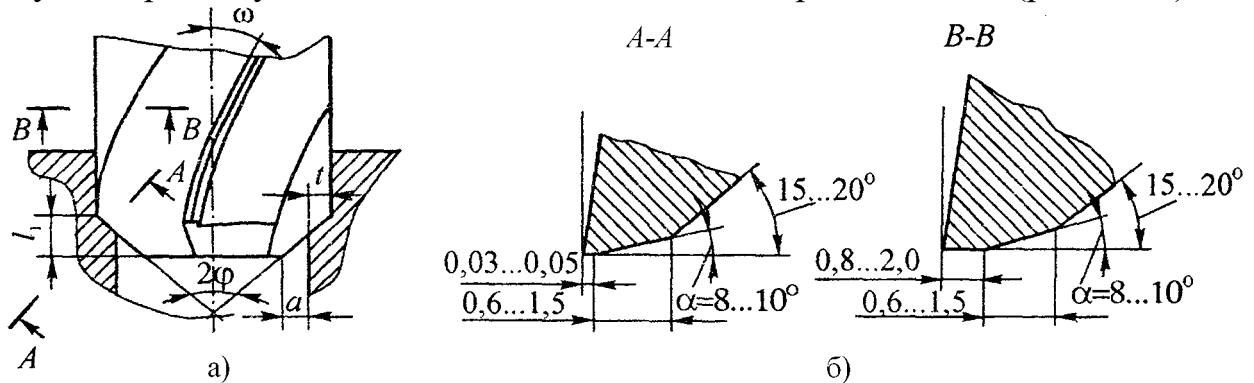


Рис. 37. Режущая часть цилиндрического зенкера: а – элементы режущей части; б – формы заточки зубьев зенкера

Режущая часть зенкера предназначена для удаления припуска. Ее длина (рис. 37):

$$l_1 = (t + a) \operatorname{ctg} \varphi = (1,5 \dots 2,0) t \cdot \operatorname{ctg} \varphi$$

где t – глубина резания;

a – дополнительная величина, облегчающая вход зенкера в отверстие, $a = (0,5 \dots 1,0)t$;

φ – главный угол в плане (половина угла при вершине).

При обработке сталей угол $\varphi = 60^\circ$. С целью повышения стойкости зенкеров рекомендуется дополнительная заточка по уголкам под углом $\varphi = 30^\circ$. При обработке чугунов угол $\varphi = 60^\circ$ или 45° .

Число канавок. Зенкеры изготавливают, как правило, с тремя (хвостовые) или четырьмя (насадные) канавками. Применяются также насадные зенкеры крупных размеров ($d > 58$ мм) с шестью и более канавками.

Канавки зенкеров обычно винтовые, но могут быть и прямыми, например, у твердосплавных зенкеров для обработки сталей и чугунов высокой твердости (рис. 36). У сборных зенкеров со вставными ножами, в том числе с напайными твердосплавными пластинами, канавки косые, наклонные к оси. Форма стружечных канавок зенкера может быть различной.

Передний угол γ_N . При проектировании новых зенкеров рекомендуются следующие значения передних углов: при обработке сталей $\gamma_N = 8 \dots 12^\circ$, чугунов $\gamma_N = 6 \dots 10^\circ$, цветных металлов $\gamma_N = 25 \dots 30^\circ$ твердых сталей и чугунов $\gamma_N = 0 \dots 5^\circ$.

Для повышения прочности режущих кромок у зенкеров с напайными твердосплавными пластинами создают угол наклона главной режущей кромки $+\lambda$, предохраняющий от выкрашивания место стыка главных режущих и вспомогательных кромок. Рекомендуется брать угол $\lambda = 12 \dots 15^\circ$.

Задний угол α у зенкеров, как и у спиральных сверл, создается заточкой по плоскости или по конической и винтовой поверхностям. Для контроля осевого биения режущих кромок при заточке или доводке на задней поверхности около режущей кромки необходимо оставлять узкую ленточку шириной $0,03 \dots 0,05$ мм. При этом величина биения режущей кромки должна быть не более $0,05 \dots 0,06$ мм. Заточка узкой ленточки крайне необходима, так как биение режущих кромок

оказывает большое влияние на нормальную работу зенкеров и особенно зенкеров, оснащенных твердым сплавом.

Например, цельный зенкер с коническим хвостовиком и напаянными пластинами твердого сплава имеет следующую геометрию (рис. 38).

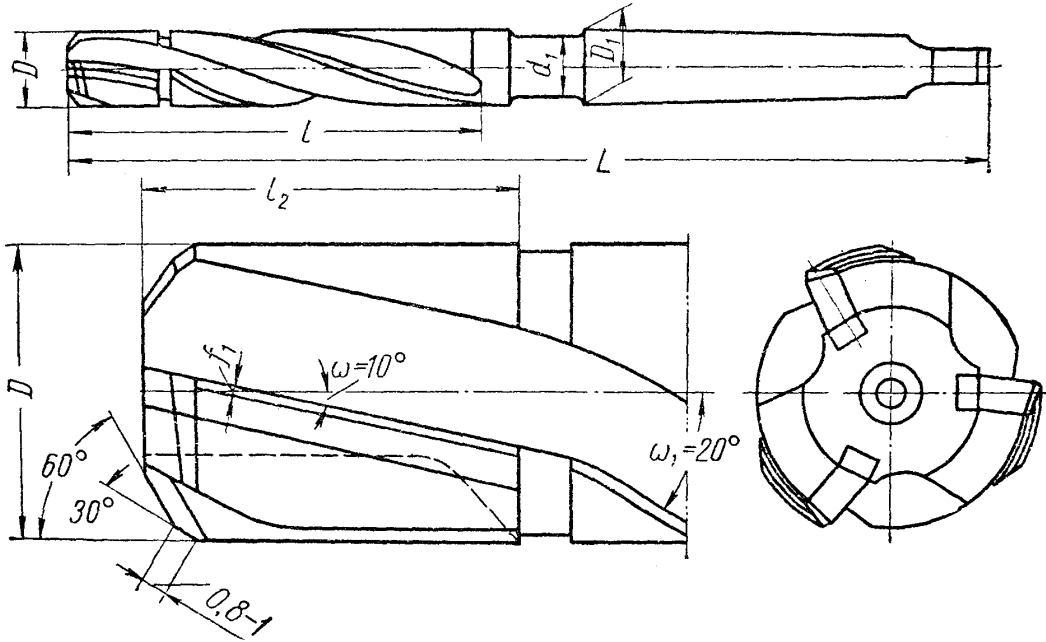


Рис. 38. Цилиндрический хвостовой зенкер с пластинами из твердого сплава

Угол ω наклона винтовой канавки зенкера на участке твердого сплава равен 10° , а на остальном участке 20° . Для обработки чугуна передний угол $\gamma = +5^\circ$; для стали $\sigma_b < 90 \text{ кг/мм}^2$, $\gamma = 0^\circ$; для стали $\sigma_b > 90 \text{ кг/мм}^2$, $\gamma = -5^\circ$.

Режущая часть имеет двойную заточку. Главный угол в плане $\phi = 60^\circ$ и угол в плане вспомогательной режущей кромки $\phi_1 = 30^\circ$ на длине $0,8\text{—}1 \text{ мм}$. Переходная кромка, заточенная под углом $\phi_1 = 30^\circ$, уменьшает выкрашивание пластинки твердого сплава в начале врезания в заготовку.

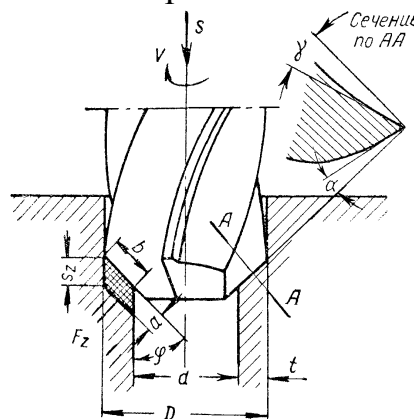


Рис. 39. Элементы резания при зенкероании

Схема работы зенкера представлена на рис. 39.

Припуск под зенкерование зависит от диаметра зенкера и обычно составляет $0,5\text{—}2 \text{ мм}$ на сторону.

Основные элементы режима резания при зенкероании – глубина t и скорость резания V — подсчитываются по тем же формулам, что и при рассверливании:

$$t = \frac{D-d}{2} \text{ мм} \quad \text{и} \quad V = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м/мин.}$$

Подача при зенкерованиях выражается в миллиметрах за один оборот зенкера.

Если учесть, что зенкер имеет несколько z режущих кромок, то подача, приходящаяся на каждую из них,

$$S_z = \frac{S}{z} \text{ мм/зуб.}$$

Площадь поперечного сечения среза, приходящаяся на одну режущую кромку,

$$f_z = S_z t = \frac{S(D-d)}{2z} \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения среза за один оборот зенкера

$$f = f_z z = \frac{S(D-d)}{2} \text{ мм}^2$$

Машинное время при зенкерованиях определяется по формуле

$$T_0 = \frac{L}{nS} = \frac{l+y+e}{nS} \text{ мин.},$$

где L — расчетная длина пути, проходимая зенкером, в мм;

l — глубина зенкерования в мм;

y — величина врезания в мм;

$$y = t \cdot \text{ctg} \varphi = \frac{D-d}{2} \text{ctg} \varphi,$$

φ — главный угол в плане;

e — величина перебега, обычно равная 1—3 мм, или выход зенкера из обрабатываемого отверстия, выбирают в зависимости от подачи $e = 3s$.

ЗЕНКОВКИ

Зенковки, в отличие от обычных зенкеров, срезают стружки большей ширины и имеют менее устойчивое положение в радиальном направлении в момент врезания и особенно в случае расположения режущих кромок перпендикулярно к оси инструмента. Этот процесс часто сопровождается вибрациями и, как следствие, выкрашиванием режущих кромок. Поэтому в конструкциях зенковок для цилиндрических углублений и подрезки торцов предусмотрены направляющие цапфы, выполненные либо за одно целое с корпусом у зенковок малых диаметров, либо вставными, сменными, у зенковок больших диаметров, которые более предпочтительны. При этом сначала цапфы входят в предварительно просверленное отверстие, а затем начинается процесс обработки отверстия. По мере износа сменные цапфы заменяются.

Зенковки изготавливают из быстрорежущей стали, а иногда оснащают напайными твердосплавными пластинами. Хвостовики зенковок соединяются с режущей частью сваркой и могут быть цилиндрическими или коническими.

Для зенкерования различных гнезд с плоским дном под головки винтов и болтов применяют цилиндрические зенковки с режущими зубьями на торцовой части поверхности (рис. 40, а).

Зенковки имеют направляющий цилиндрический стержень, который обеспечивает соосность отверстия и обрабатываемого углубления.

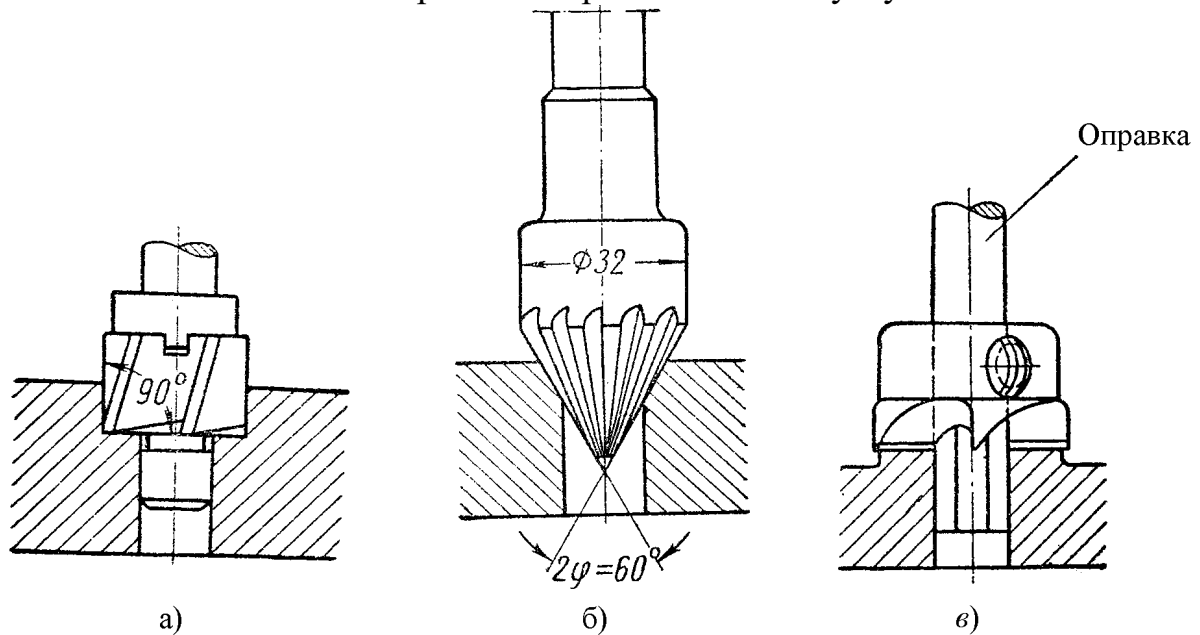


Рис. 40. Зенковки: а – для цилиндрических гнезд; б – коническая; в – торцовый зенкер – цековка.

Для обработки конических углублений под головки винтов, для снятия фасок и заусенцев с краев отверстий применяют конические зенковки (рис. 40, б) с углом при вершине 2φ , равным 30, 60, 90 и 120° и числом зубьев от 6 до 12.

Конические зенковки также используют и для получения центровых отверстий в заготовках.

При обработке торцовых плоскостей, различных приливов, бобышек под головку болта, под гайку или шайбу применяют так называемое цекование, осуществляемое торцовыми зенкерами (цековками). Режущие зубья у цековки расположены только на торцовой поверхности (рис. 40, в).

Торцовые зенкеры насаживаются на оправку, а малые зенкеры изготавливаются цельными. Зенкеры работают с углом резания $\delta = 80 \div 90^\circ$; задний угол α выбирают от 4 до 8°. Эти зенкеры имеют от четырех до восьми режущих зубьев.

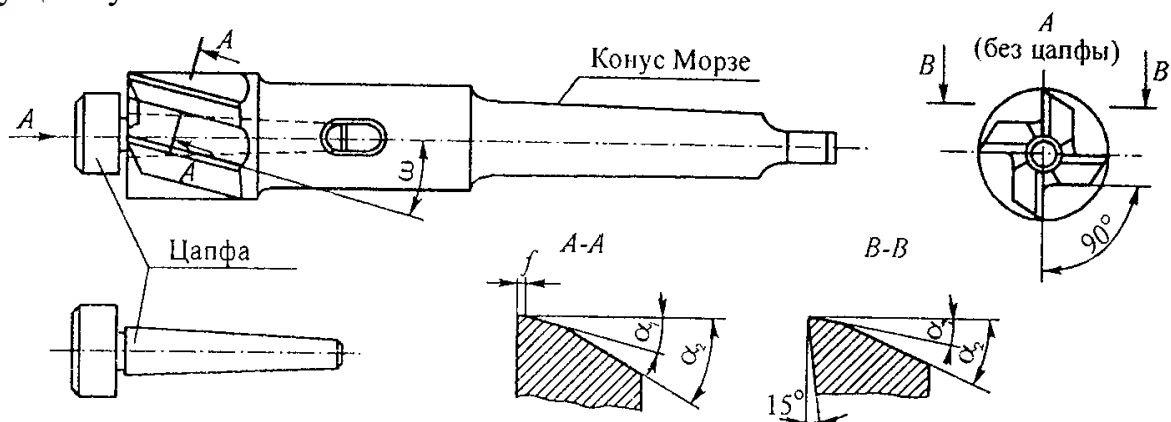


Рис. 41. Зенковка со сменной направляющей

На рис. 41 показана зенковка для обработки углубления с плоским дном чтобы скрыть головки болтов или винтов. Данная зенковка выполнена со сменной цапфой/направляющей.

РАЗВЕРТКИ

Развертки классифицируют по следующим признакам:

- а) вид привода – ручные и машинные;
- б) способ крепления – хвостовые и насадные;
- в) вид обрабатываемого отверстия - цилиндрические и конические;
- г) вид режущего материала - быстрорежущие, твердосплавные и алмазные;
- д) конструкция – цельные и сборные (со вставными ножами).

Ручными развертками (рис.42) обрабатывают отверстия путем вращения инструмента вручную – воротком. Эти развертки ($d= 3...40$ мм) изготавливают из инструментальной стали марки 9ХС. Для лучшего направления развертки в отверстия у нее затачивают длинный заборный конус и калибрующую часть. В остальном конструкция ручных разверток не отличается от машинных.

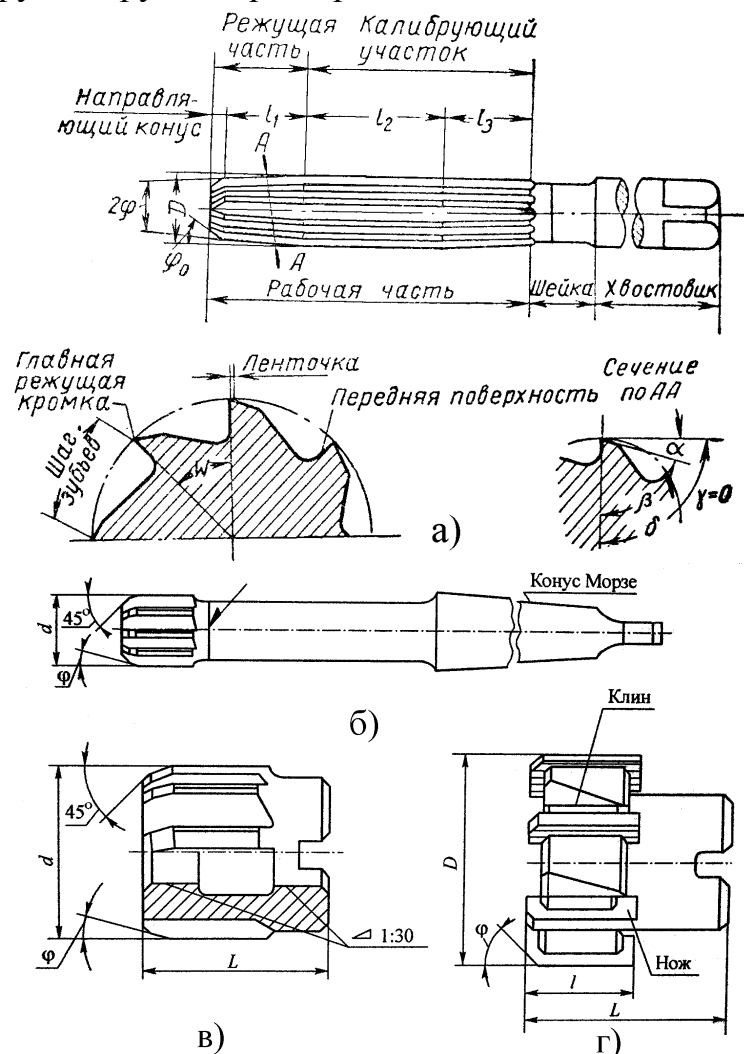


Рис. 42. Типы разверток с основными частями: а – ручная; б – машинная; в – насадная; г – сборная.

Машинные концевые и насадные развертки цельные и сборные (рис. 42, б, в, г) применяют для обработки отверстий на сверлильных, токарных,

револьверных, координатно-расточных и других станках. Хвостовики машинных разверток бывают цилиндрические ($d = 1...9$ мм) и конические ($d = 10...32$ мм) с относительно длинной шейкой и конусом Морзе. Хвостовики разверток изготавливают из конструкционных сталей 45 или 40Х и соединяют с рабочей частью из быстрорежущей стали сваркой. Насадные развертки крепятся на оправках. При этом коническое посадочное отверстие (конусность 1:30) обеспечивает центрирование с высокой точностью. Для передачи крутящего момента на правом торце развертки делается паз под шпонку.

Длина заборного конуса развертки:

$$l_1 = (1,3...1,4)t \cdot ctg\varphi$$

Длина режущей части у ручных разверток составляет $l=(4...10)d$, у машинных $l=(0,75...2,0)d$.

Процесс резания каждого зуба развертки можно рассматривать как работу широкого чистового резца, снимающего стружку при очень малой глубине резания.

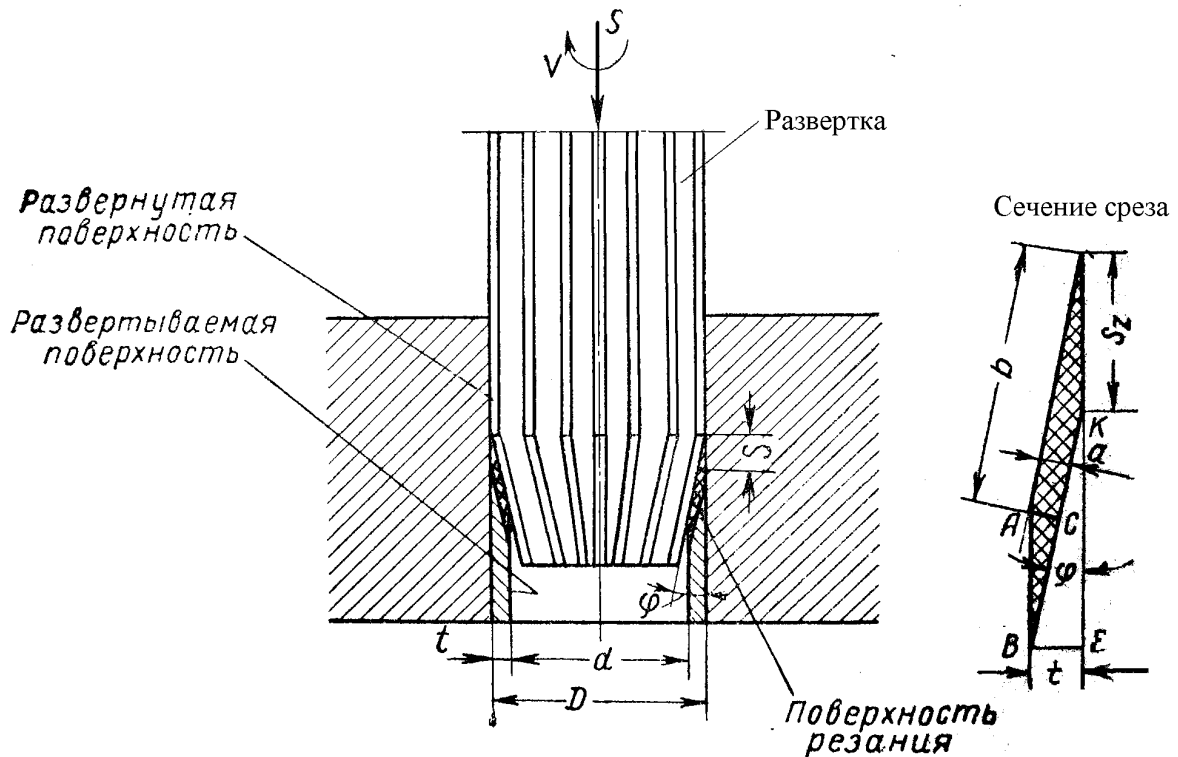


Рис. 43. Схема резания разверток

Скорость резания V , глубина резания t и подача на зуб S_z при развертывании определяются аналогично зенкерованиему (рис. 43):

$$t = \frac{D-d}{2} \text{ мм}, \quad V = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м/мин}, \quad S_z = \frac{S}{z} \text{ мм/зуб.}$$

Толщина среза a , приходящаяся на один зуб развертки, определяется из треугольника ABC по формуле

$$a = S_z \sin \varphi = t \sin \varphi.$$

Ширина среза b определяется из треугольника KBE :

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} = \frac{D-d}{2 \sin \varphi}.$$

Площадь поперечного сечения среза, приходящаяся на одну режущую кромку,

$$f_z = ab = \frac{S(D-d)}{2z} \text{ мм}^2$$

Общая площадь поперечного сечения среза за один оборот развертки

$$f = f_z z = \frac{S(D-d)}{2} \text{ мм}^2$$

Машинное время при развертывании определяется по формуле

$$T_0 = \frac{L}{nS} = \frac{l+y+e}{nS} \text{ мин.}$$

В указанных формулах приняты обозначения те же, что и при зенкеровании.

Цилиндрическая развертка, применяемая для развертывания цилиндрических отверстий, представляет собой цилиндрический стержень, имеющий продольные прямые или винтовые канавки, образующие режущие кромки (рис. 42, а).

Развертка состоит из трех основных частей: рабочей части, шейки и хвостовика.

Рабочая часть развертки, в свою очередь, состоит из режущей части, цилиндрической калибрующей части и обратного конуса.

Режущая часть (заборный конус) длиной l_1 имеет на себе режущие кромки, выполняющие основную работу резания.

Калибрующая часть l_2 служит для калибрования отверстия и правильного направления развертки в отверстии. Обратный конус длиной l_3 служит для уменьшения трения развертки о поверхность отверстия.

Разность между наибольшим и наименьшим диаметрами обратного конуса составляет 0,01—0,08 мм.

Хвостовик служит для закрепления развертки в патроне или удержания ее в воротке во время работы. В зависимости от методов крепления хвостовика могут быть цилиндрическими с квадратной головкой или коническими.

По характеру применения развертки делятся на ручные и машинные (рис. 42). Машинные развертки имеют более короткую рабочую часть, чем ручные, и отличаются формой хвостовика.

Углы режущих зубьев. В зависимости от обрабатываемого материала, конструкции и назначения развертки выбираются основные углы зубьев.

Главный угол в плане ϕ или угол заборного конуса 2ϕ (рис. 42) оказывает значительное влияние на осевое усилие. С увеличением угла заборного конуса 2ϕ увеличивается осевое усилие, затрудняется продвижение развертки в глубь отверстия. Поэтому для ручных разверток в целях облегчения продвижения их в осевом направлении главный угол в плане ϕ выбирается небольшим – в пределах от $30'$ до $1,5^\circ$. Для машинных разверток из инструментальных сталей угол ϕ берется равным $4 \div 5^\circ$ при обработке чугуна и $10 \div 15^\circ$ при обработке стали.

Развертки, оснащенные твердым сплавом, имеют главный угол в плане $\phi = 30 \div 45^\circ$.

В целях лучшего ввода развертки в отверстие, и предохранения режущих зубьев от повреждения при наличии повышенного припуска на режущей части делается направляющий конус с углом $\phi_0 = 45^\circ$ (рис. 42).

Передний угол γ разверток измеряется в плоскости, нормальной к режущей кромке. Чистовые развертки изготавливаются с радиальной заточкой передней поверхности, т. е. у них передний угол $\gamma=0^\circ$, а угол резания $\delta = 90^\circ$; черновые и предварительные развертки для обработки вязких металлов имеют передний угол $\gamma = 5 \div 10^\circ$. Развертки, оснащенные пластинками твердых сплавов, изготавливаются даже с отрицательным передним углом в пределах $0 - 5^\circ$, что способствует получению гладкой и чистой поверхности отверстия.

Задний угол на заборной части развертки измеряется в той же секущей плоскости, что и передний, т. е. в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке. Задний угол делается обычно небольшой: $\alpha = 6 \div 12^\circ$, благодаря чему сохраняется прочность режущих кромок. Для чистовых ручных разверток задний угол $\alpha = 3 \div 6^\circ$. Задний угол калибрующей части измеряется в плоскости, перпендикулярной к оси развертки. Этот угол обычно делают равным нулю, так как зубья имеют на цилиндрической поверхности ленточку (фаску).

Эта ленточка обеспечивает направление развертки в отверстии, способствует калиброванию отверстия по размеру, повышает чистоту обработки и сохраняет размер диаметра при переточке развертки по передней поверхности зуба. Ширина ленточки (фаски) обычно составляет $f = 0,05 \div 0,3$ мм.

Угол наклона режущих кромок и канавок. Развертки изготавливаются как с прямыми, так и с винтовыми канавками.

Развертки с винтовыми (спиральными) канавками рекомендуется применять для обработки отверстий, имеющих продольные канавки, пазы, выемки. В этом случае зуб врезается в металл не сразу по всей длине режущей кромки, а постепенно, обеспечивая тем самым высокую чистоту поверхности.

Различают развертки правого и левого вращения (рис. 44).

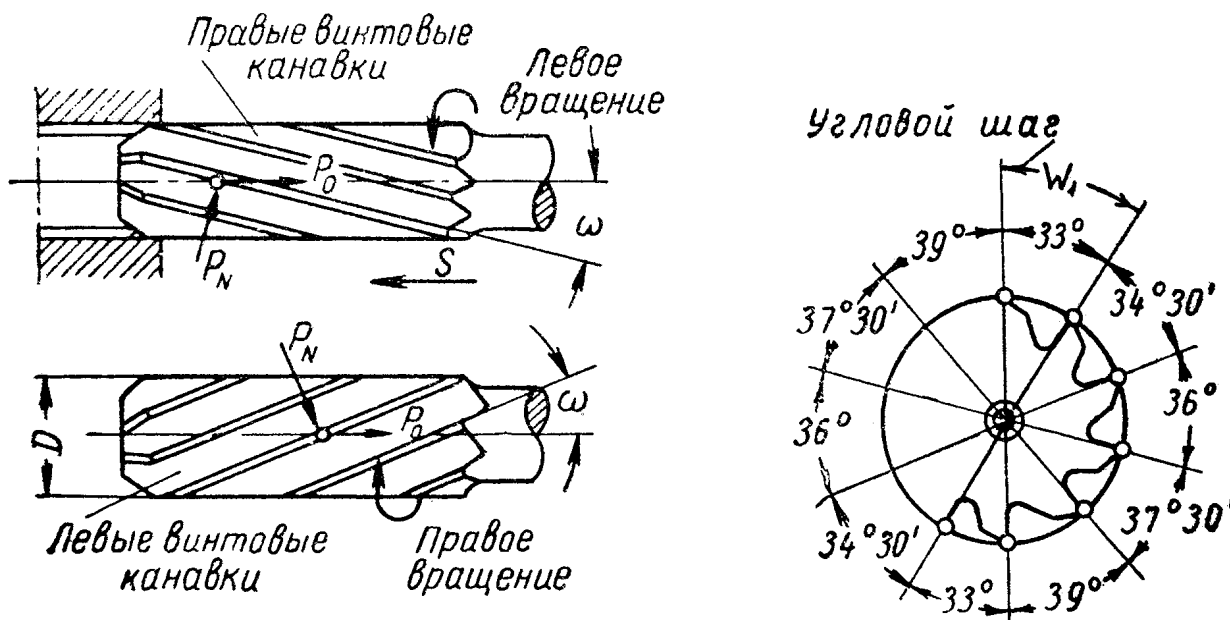


Рис.44. Развертки с различным направлением винтовых канавок и переменным угловым шагом зубьев

Развертками правого вращения называют такие развертки, у которых в процессе работы, если смотреть на них со стороны хвостовиков, вращение

происходит по часовой стрелке. Развертки левого вращения имеют движение против часовой стрелки.

Развертки с правыми винтовыми канавками имеют подъем канавок слева направо (рис. 44).

Чтобы избежать ввертывания и затягивания развертки с винтовыми зубьями в отверстие, для правого вращения применяют развертки с левыми винтовыми канавками и, наоборот, для левого вращения применяются развертки с правыми винтовыми канавками.

Угол наклона канавок ω выбирается в зависимости от обрабатываемого материала: для твердой стали $\omega = 6 \div 8^\circ$, для мягкой стали $\omega = 12 \div 20^\circ$.

Число зубьев развертки и неравномерный шаг

Точность отверстия и чистота обработанной поверхности зависят как от количества зубьев развертки, так и от их расположения по окружности.

С увеличением количества зубьев развертки уменьшается толщина стружки, снимаемой каждым зубом; развертка работает плавнее, имеет лучшее направление, что способствует улучшению чистоты обработанной поверхности.

Число зубьев развертки выбирается в зависимости от обрабатываемого материала и диаметра развертки. Стандартные развертки имеют число зубьев от 6 до 12. Развертки, предназначенные для обработки отверстий повышенной точности, имеют несколько большее число зубьев, обычно четное, благодаря чему облегчается измерение их диаметра.

Для повышения чистоты обработанной поверхности отверстия стандартные развертки имеют неравномерный шаг зубьев по окружности (рис. 44). Так, например, если для развертки с числом зубьев $z = 10$ при равномерной разбивке угловой шаг

$$\omega = \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ,$$

то при неравномерной разбивке шаг зубьев у данной развертки будет равен $\omega_1 = 33^\circ$; $\omega_2 = 34^\circ, 30'$; $\omega_3 = 36^\circ$; $\omega_4 = 37^\circ, 30'$ и $\omega_5 = 39^\circ$. Последующие пять шагов повторяются в том же порядке (рис. 44).

Неравномерное распределение зубьев по окружности предупреждает появление продольных рисок и граненой поверхности, возникающих в результате неоднородности обрабатываемого материала.

Для облегчения измерения диаметра развертки шаг зубьев подбирают так, чтобы каждая пара диаметрально противоположных зубьев лежала на одном диаметре.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ДРУГИХ ТИПОВ РАЗВЕРТОК

В ремонтном деле применяются цилиндрические **ручные развертки, регулируемые по диаметру** (рис. 45, а). Корпус развертки, изготовленный из стали 9ХС, имеет отверстие, состоящее из конической и цилиндрической частей, в которое помещается шарик 2 (либо конус), передвигаемый регулировочным винтом вдоль оси. Между зубьями по впадине сделаны продольные прорези. По мере перемещения шарика винтом за счет упругих деформаций стенок развертки

увеличивается диаметр калибрующей части развертки. Величина Δ регулирования диаметра небольшая и берется в зависимости от диаметра развертки, например, для $d = 10...20$ мм $\Delta = 0,25$ мм, для $d = 20...30$ мм $\Delta = 0,4$ мм, для $d = 30...50$ мм $\Delta = 0,5$ мм.

Машинные развертки, изготавливаемые насадными сборными (рис. 45, б), можно регулировать по диаметру за счет перестановки ножей по рифлениям. Более тонкую регулировку можно осуществить путем перемещения ножей с рифлениями вдоль пазов, наклоненных под углом 5° к оси развертки. У таких инструментов ножи упираются торцами в регулировочную гайку с контргайкой, а их закрепление осуществляется специальными эксцентриковыми кулачками, боковые стороны которых прошлифованы по архимедовой спирали.

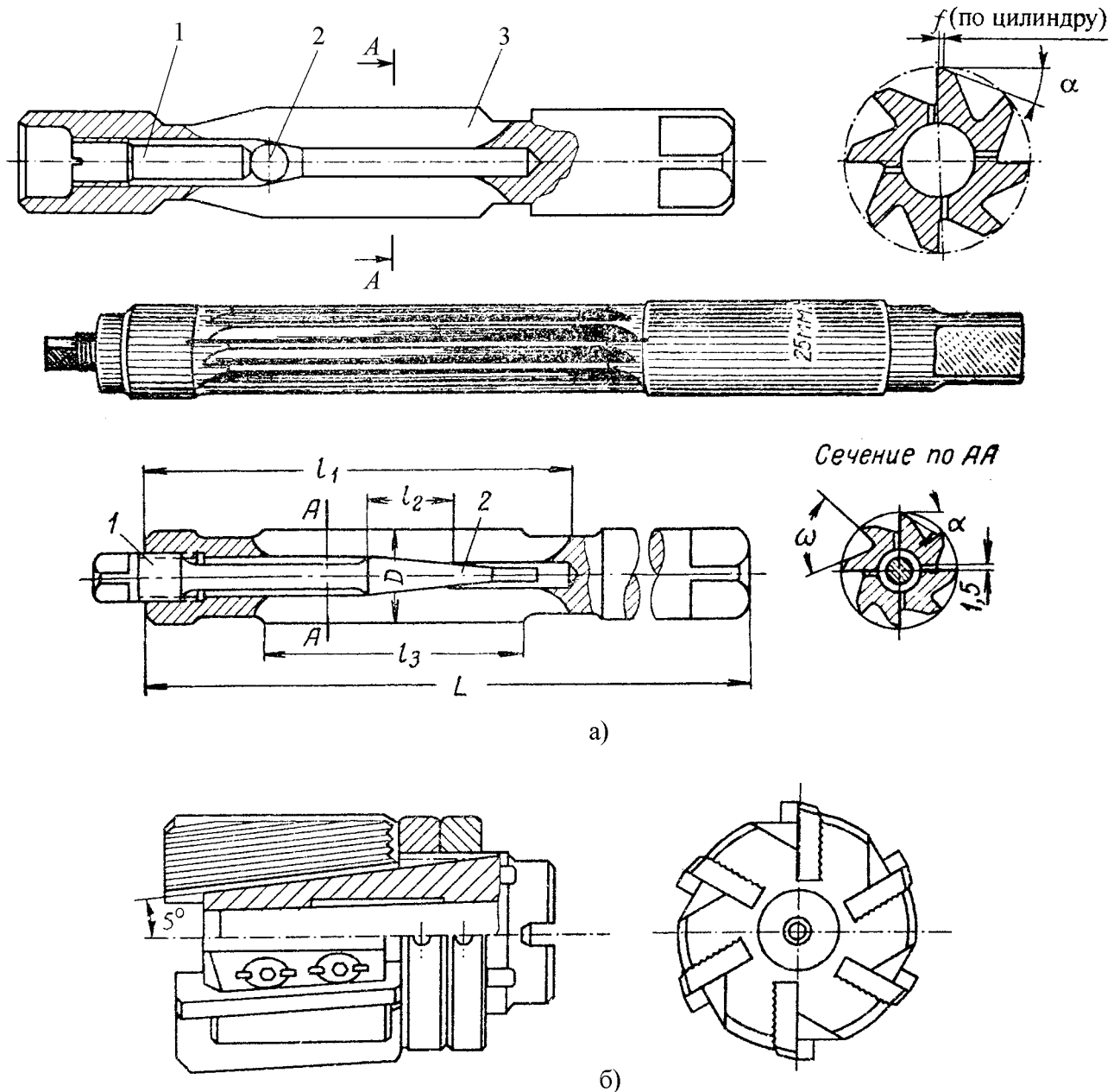


Рис. 45. Развертки, регулируемые по диаметру: а - ручная; б - машинная, насадная, сборная

При эксплуатации регулируемых разверток следует иметь в виду, что после каждой регулировки необходима шлифовка и доводка развертки по диаметру,

так как из-за жестких требований к точности диаметра развертки ее невозможно обеспечить только регулировкой.

Развертки с кольцевой заточкой нашли широкое применение в тяжелом машиностроении благодаря высокой производительности и надежности в работе.

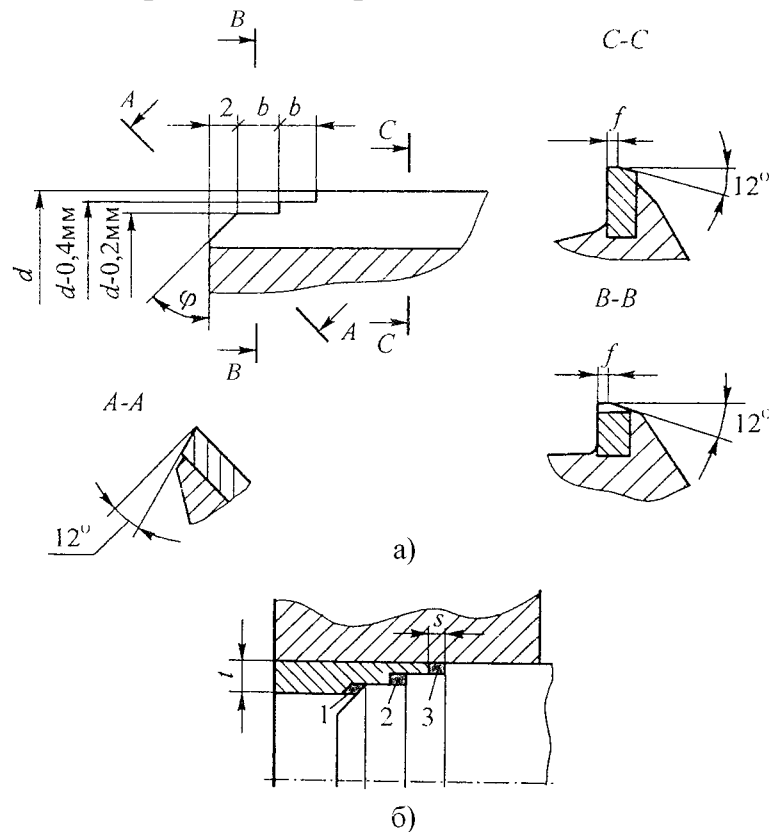


Рис. 46. Развертка кольцевая: *а* - конструкция; *б* – распределение рипуска.

Режущая часть таких разверток (рис. 46, *а*) не имеет заборного конуса, а состоит из трех участков. На режущей части развертки находится направляющий конус длиной до 2 мм с углом $\varphi = 45^\circ$ и зубьями, заточенными с задним углом, равным $\alpha = 12^\circ$, снимающими припуск, как зенкер. Затем следуют второй и третий участки, выполненные в виде кольцевых поясков шириной $b = 2 \dots 4$ мм (в зависимости от размера развертки) и диаметром на $0,2 \dots 0,4$ мм меньшим, чем диаметр калибрующей части. Главные режущие кромки, снимающие припуск, расположены на торцах уступов под углом $\varphi = 90^\circ$ к оси и имеют нулевой задний угол. Калибрующая часть – цилиндрическая, шлифуется по направляющим ленточкам шириной f без обратного конуса за одну установку. Число зубьев уменьшено, за счет чего увеличен объем стружечных канавок.

Благодаря тому, что главные режущие кромки расположены перпендикулярно к оси развертки (рис. 46, *б*), радиальная составляющая силы резания очень мала, а широкие кольцевые ленточки обеспечивают лучшее направление развертки в отверстии. При этом точность по диаметру при обработке стали составляет $IT8$, шероховатость поверхности - $Ra 1,25 \dots 0,63$ мкм, а производительность по сравнению с обычными развертками выше на 50%. Благодаря простоте переточки по конусу и ленточкам такие развертки имеют большую стойкость, допуская от 10 до 20 переточек.

Крепление разверток в шпинделе станка жесткое, а биение и несоосность развертки с обрабатываемым отверстием должны быть не более 0,1 мм.

Развертки такой конструкции позволяют увеличить припуск под развертывание до 1 мм на сторону, причем их можно применять сразу после сверления, исключая операцию зенкерования.

Котельные развертки (рис. 47) применяют при подготовке отверстий под заклепки в двух или более соединяемых листах. Они получили широкое распространение в котло-, корабле- и авиастроении, а также при изготовлении мостовых конструкций.

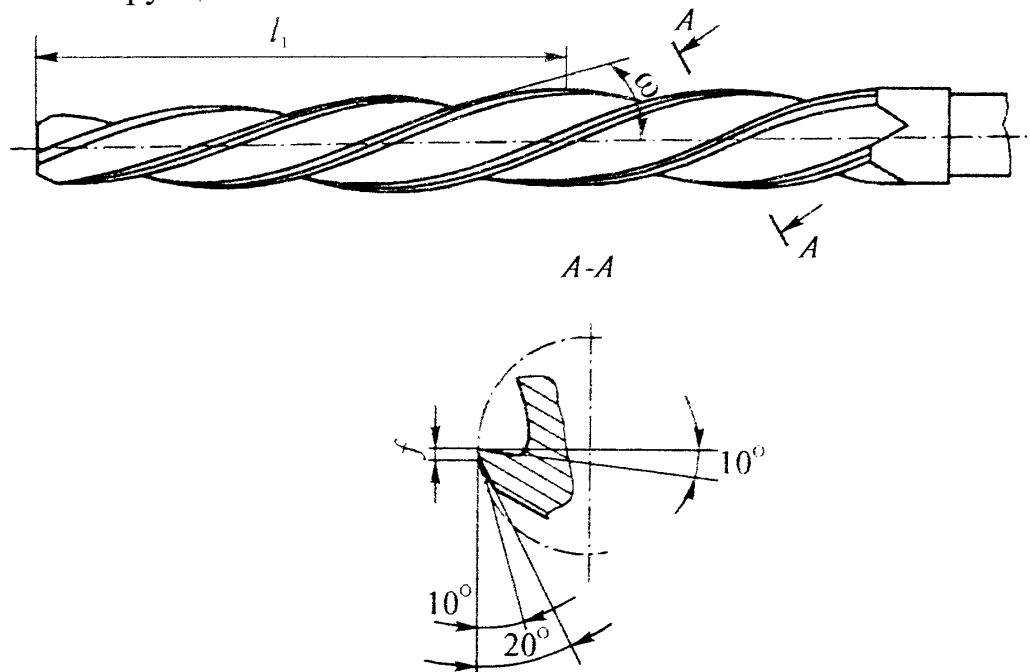


Рис. 47. Развертка котельная

Котельные развертки работают в тяжелых условиях, так как из-за неизбежных несовпадений осей отверстий в пакетах листов приходится удалять большой припуск - до 1...2 мм на сторону, т.е. почти как при зенкеровании. При этом обрабатываемые материалы, как правило, вязкие и пластичные.

Для лучшего направления разверток в отверстиях, снижения осевых усилий и уменьшения шероховатости поверхности используются винтовые зубья с углом $\omega = 25...30^\circ$ с направлением, обратным вращению инструмента. Котельные развертки имеют малый угол заборного конуса, равный $2\varphi = 3...5^\circ 30'$ и, соответственно, большую длину режущей части, равную $1/3... 1/2$ длины рабочей части инструмента. Число зубьев $z = 4...6$ при диаметре разверток $d = 6...40$ мм. Передний угол зубьев в сечении, перпендикулярном к винтовым канавкам, $\gamma = 12... 15^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$. Зубья на калибрующей части имеют узкие направляющие ленточки шириной $f = 0,2...0,3$ мм с обратной конусностью $0,05... 0,07$ мм на 100 мм длины.

Котельные развертки изготавливают как ручные с цилиндрическим хвостовиком, так и машинные с коническим хвостовиком, устанавливаемые на радиально-сверлильных станках или на пневматических дрелях.

Для лучшего направления разверток иногда впереди их рабочей части предусматривают направляющие цапфы, как у зенковок. У разверток больших диаметров с целью обеспечения надежного дробления стружки на зубьях заборного конуса в шахматном порядке наносят стружкоделительные канавки.

Конические развертки применяют для получения точных конических отверстий под штифты (конусность 1:50), конусы Морзе и метрические, посадочные отверстия насадных зенкеров и разверток (конусность 1:30) и др. Конические отверстия формируют либо из цилиндрических, полученных сверлением, либо из конических отверстий, полученных расточкой при обработке очень крутых конусов, например с конусностью 7:24.

Условия работы таких разверток очень тяжелые, так как у них длина режущих кромок, снимающих припуск, большая и равна длине образующей конуса, а толщина срезаемого слоя определяется перепадом диаметров.

Требования к точности конических отверстий достаточно высоки, так как от нее часто зависят прочность и герметичность соединяемых деталей, величина передаваемого крутящего момента и др. При этом точность обработанных отверстий обеспечивается точностью изготовления разверток.

В отличие от цилиндрических, у конических разверток отсутствует разделение на режущую и калибрующую части, так как зубья, расположенные на конической поверхности, являются одновременно и режущими, и калибрующими.

При обработке отверстий с конусностью большей 1:20 приходится снимать припуск такой большой величины, что его можно удалить только с помощью комплекта разверток.

На рис. 48 приведен комплект конических разверток из трех номеров, применяемый для обработки отверстий под конус Морзе.

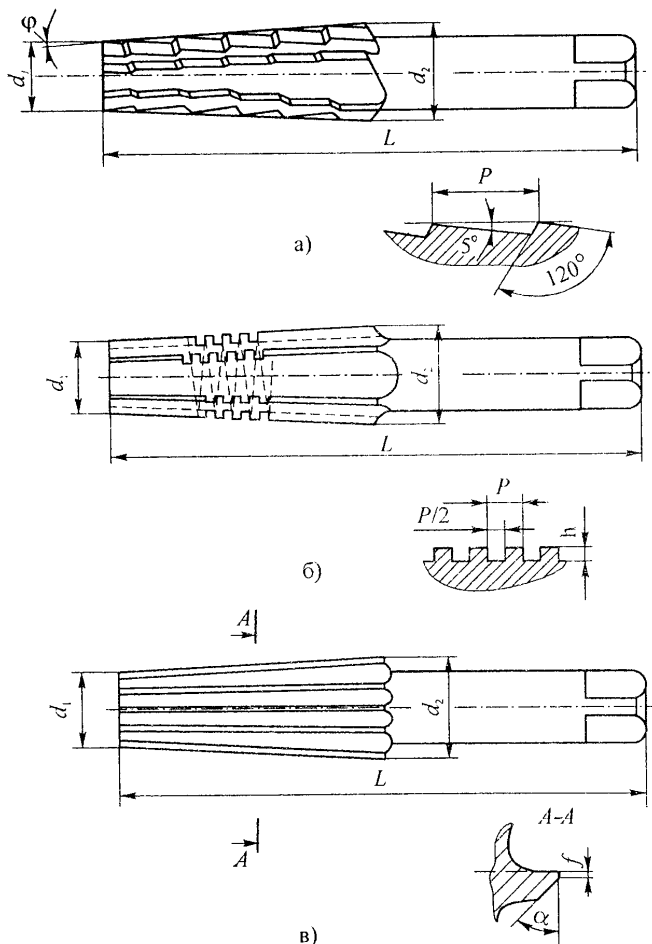


Рис. 48. Комплект конических разверток

Развертка №1 - черновая, имеет ступенчатую форму зубьев, расположенных по винтовой поверхности, которая совпадает по направлению с направлением вращения инструмента. Припуск снимается режущими кромками, расположенными на торцах зубьев, как при зенкеровании. После прохода такой развертки цилиндрическое отверстие превращается в ступенчатое. У развертки № 1 стружечные канавки прямые, а их число равно 4...8 и зависит от диаметра конуса.

Развертка № 2 - промежуточная, имеет форму обрабатываемого отверстия. Ее режущие кромки делятся на отдельные мелкие участки прямоугольной резьбой, имеющей направление, обратное вращению инструмента. Шаг резьбы $P = 1,5...3,0$ мм, ширина канавок $P/2$, а глубина $h=0.2P$. Эта развертка обеспечивает дробление снимаемого припуска на более мелкие ступени.

Развертка № 3 - чистовая, имеет прямые зубья по всей длине режущей части, а для более устойчивого положения развертки в отверстии на вершинах ее зубьев делаются ленточки шириной 0,05 мм. Эта развертка обеспечивает срезание остаточной части припуска и калибрует отверстие.

У конических разверток стружечные канавки прямые, передний угол на режущих кромках $\gamma = 0^\circ$, задние поверхности зубьев у разверток № 1 затылованы, а у разверток № 2 и 3 заточены под углом $\alpha = 5^\circ$.

При обработке отверстий под штифты с конусностью 1:50 достаточно одной чистовой развертки, а с конусностью 1:30 необходимо использовать две развертки.

Развертки твердосплавные. Условия резания при развертывании благоприятны для применения твердых сплавов, так как для этих инструментов характерны малые нагрузки на режущие зубья, устойчивое положение в отверстии и высокая жесткость. Применение твердых сплавов благодаря их высокой износостойкости в несколько раз повышает стойкость разверток, особенно при обработке отверстий в труднообрабатываемых сталях и высокопрочных чугунах. Однако реализовать возможность повышения скорости резания в несколько раз при использовании твердосплавных разверток не удастся из-за возникновения вибраций, ухудшающих качество обработанной поверхности. Только в конструкциях разверток одностороннего резания с использованием внутреннего напорного охлаждения и с работой хвостовика на растяжение удалось при обработке конструкционных сталей достичь скоростей резания $V = 120$ м/мин.

Использование твердых сплавов при оснащении обычных машинных разверток возможно в трех вариантах: 1) изготовление рабочей части целиком из твердых сплавов, полученных методом прессования или из пластифицированных заготовок с последующим их спеканием; 2) пайка стандартных пластин непосредственно на корпус развертки или на ножи в сборных развертках; 3) механическое крепление пластин на корпусе развертки.

Развертки диаметром до 3 мм изготавливают целиком из твердого сплава в виде трех-, четырех- или пятигранника (рис. 49, а) с заборным конусом, без стружечных канавок с отрицательными передними углами на режущих кромках. В этом случае снимаемые припуски чрезвычайно малы, а процесс резания подобен шабрению.

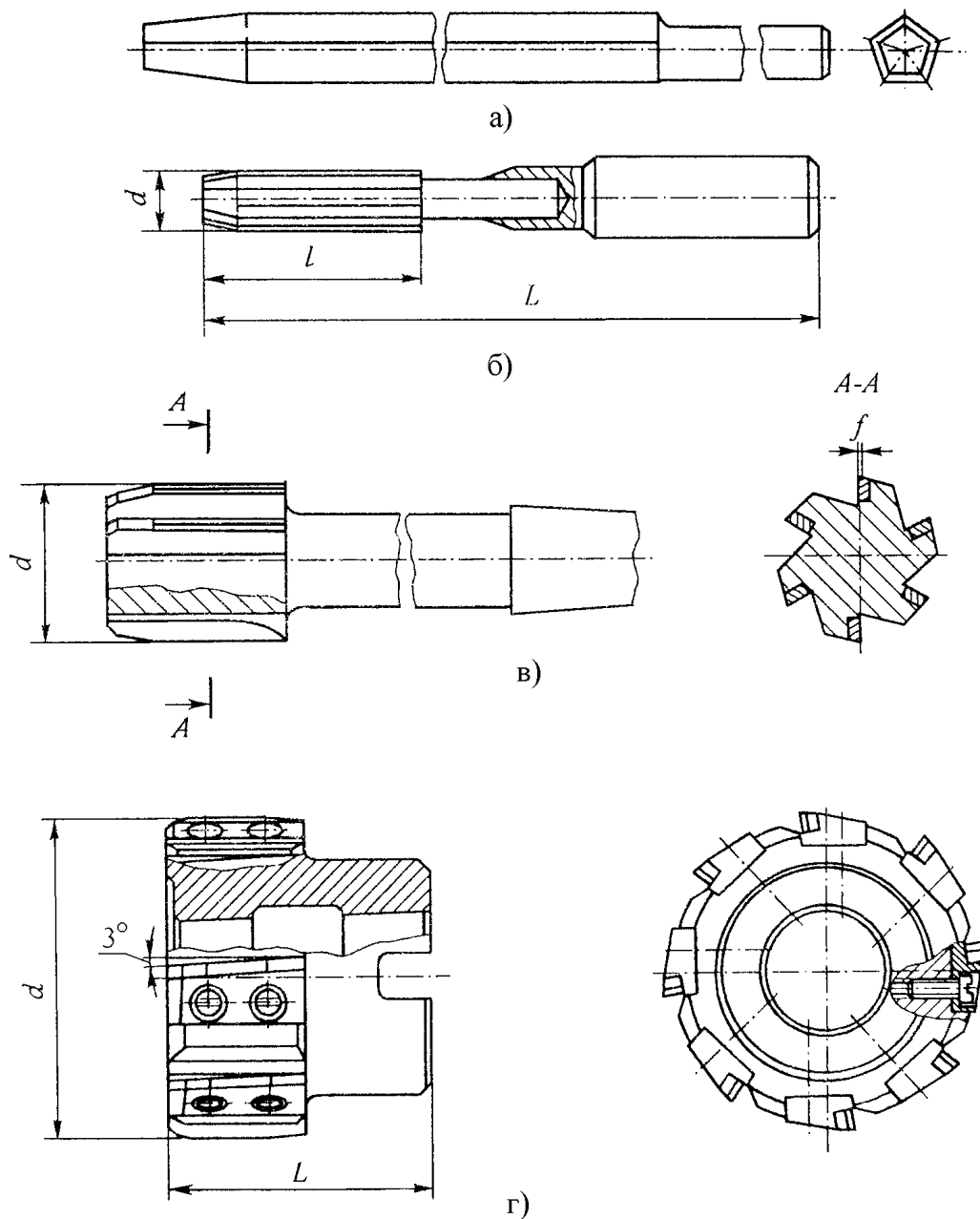


Рис. 49. Твердосплавные развертки: а – гранная цельная; б – с цельной твердосплавной рабочей частью, припаянной к хвостовику; в – хвостовая с напаянными твердосплавными пластинами; г – насадная с твердосплавными пластинами.

На рис. 49, б приведена конструкция развертки с цельной твердосплавной рабочей частью и стальным хвостовиком, соединенным пайкой. Такие развертки изготавливают диаметрами 3...12 мм.

На рис. 49, в показана концевая развертка с твердосплавными пластинками, напаянными на корпус, а на рис. 49, г - насадная развертка с пластинами, напаянными на ножи, закрепленные винтами на корпусе инструмента. Такие развертки диаметрами 150...300 мм можно регулировать по диаметру с помощью подкладок под ножи.

Учитывая, что при развертывании температура резания невелика, в последнее время вместо пайки стали использовать высокопрочные клеи, что значительно упрощает процесс изготовления разверток и обеспечивает

повышение стойкости твердосплавных пластин за счет отсутствия термических напряжений.

Развертки одностороннего резания изготавливают с одним или несколькими ножами и опорными пластинами. Благодаря выглаживающему действию опорных твердосплавных направляющих, воспринимающих радиальную составляющую сил резания и трения, они обеспечивают высокую точность отверстий и низкую шероховатость их поверхностей. Такие развертки изготавливаются серийно, например фирмой «Maral» (ФРГ) в диапазоне диаметров 8...100 мм, и применяются для развертывания неглубоких отверстий. Режущие пластины у них могут быть регулируемы по диаметру с использованием разных способов механического крепления. Один из вариантов таких разверток показан на рис. 50. За счет применения внутреннего напорного охлаждения СОЖ на масляной основе удалось достичь при обработке сталей следующих режимов резания: $V = 70...90$ мм, $S = 0,1...0,5$ мм/об, $t = 0,15$ мм.

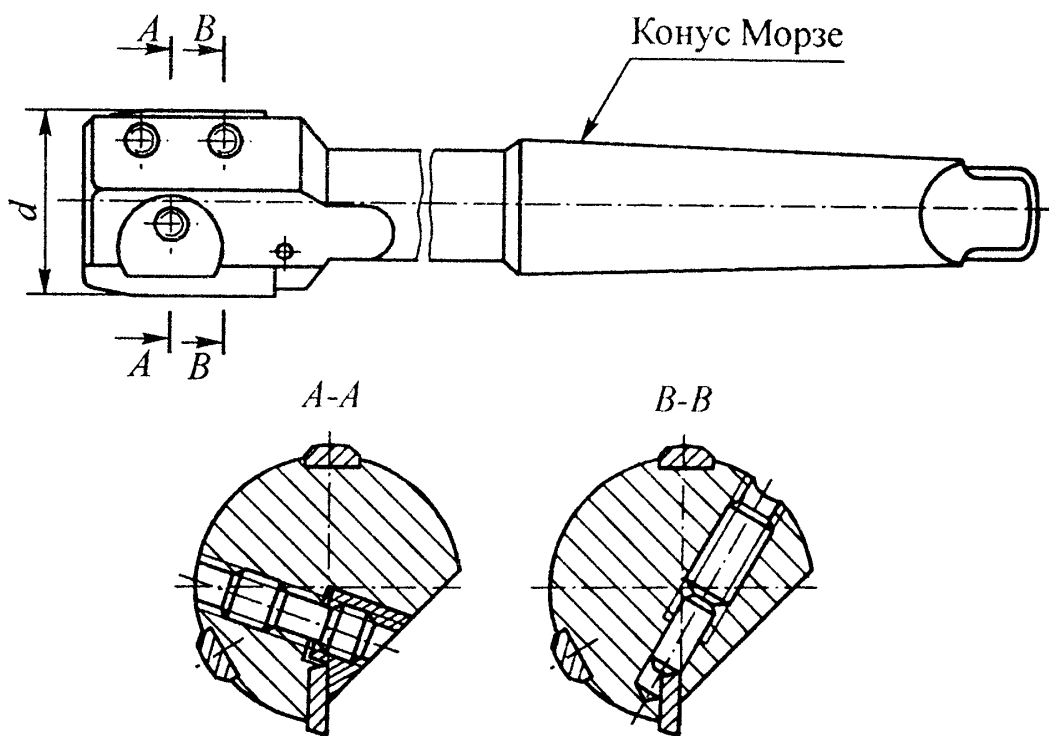


Рис. 50. Твердосплавные развертки одностороннего действия

Твердосплавные развертки имеют следующие основные отличия от быстрорежущих: а) меньше длина рабочей части (у разверток с напайными пластинами она равна длине пластин); б) малая длина заборного конуса, так как с целью уменьшения вибраций угол ϕ увеличен до 45° ; в) на режущих кромках при нулевых передних углах затачивают узкие упрочняющие фаски с отрицательным передним углом $\gamma = -5^\circ$; г) обратный конус из-за малой длины калибрующей части обычно не делают, его заменяют закруглением по радиусу.

ФРЕЗЫ

Фрезерование представляет собой весьма распространенный и высокопроизводительный метод обработки металлов резанием, широко используемый в современном машиностроении.

Обработка фрезерованием производится на различных фрезерных станках, где в качестве режущего инструмента применяют фрезы самых разнообразных форм и размеров.

Фрезы - это многозубые режущие инструменты, применяемые для обработки плоскостей, пазов, фасонных поверхностей, тел вращения, а также для резки материалов.

Фрезами выполняют как черновую, так и чистовую обработку поверхностей.

Различают два основных вида фрезерования; **цилиндрическое** и **торцовое** (рис. 51).

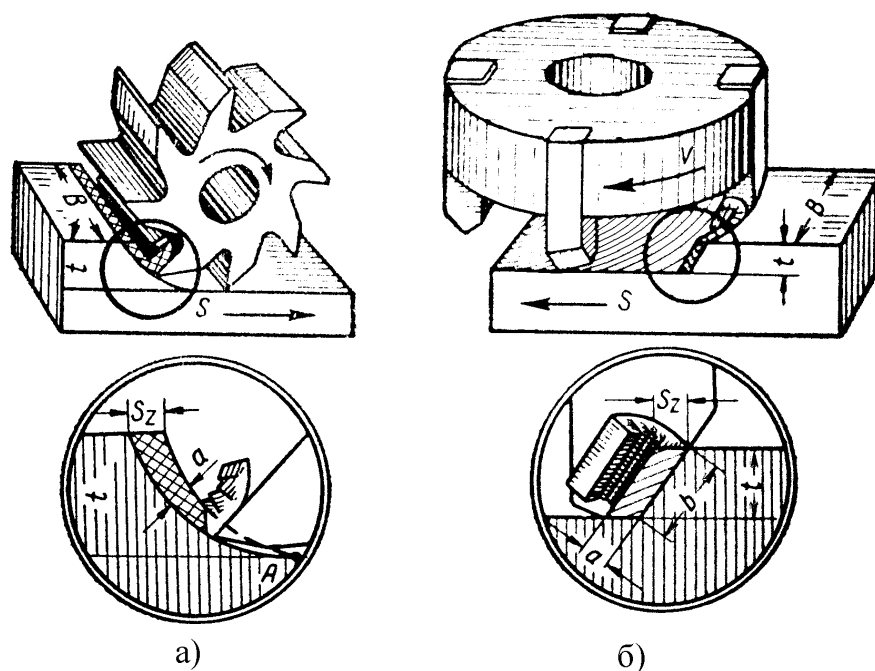


Рис. 51. Виды фрезерования: а – цилиндрическое; б – торцовое.

Наиболее широкое применение в металлообрабатывающей промышленности получили следующие типы фрез: **цилиндрические** (рис. 52, а) и **торцовые** (рис. 52, б) фрезы для обработки плоскостей; **дисковые** фрезы (рис. 52, в, г) и **отрезные** и **прорезные** фрезы (рис. 52, д) для фрезерования пазов, уступов и резки металлов; **концевые** фрезы (рис. 52, е, ж) для обработки уступов, плоскостей и фрезерования пазов; **угловые** фрезы (рис. 52, з) для фрезерования канавок углового профиля; **фасонные** фрезы (рис. 52, и, к) для получения поверхностей сложной формы.

Главным движением при фрезеровании является вращение фрезы, движением подачи — поступательное перемещение заготовки относительно фрезы. Движение подачи может быть прямолинейным, вращательным или винтовым, а режущие кромки фрезы - прямолинейными, наклонными к оси, винтовыми или фасонными.

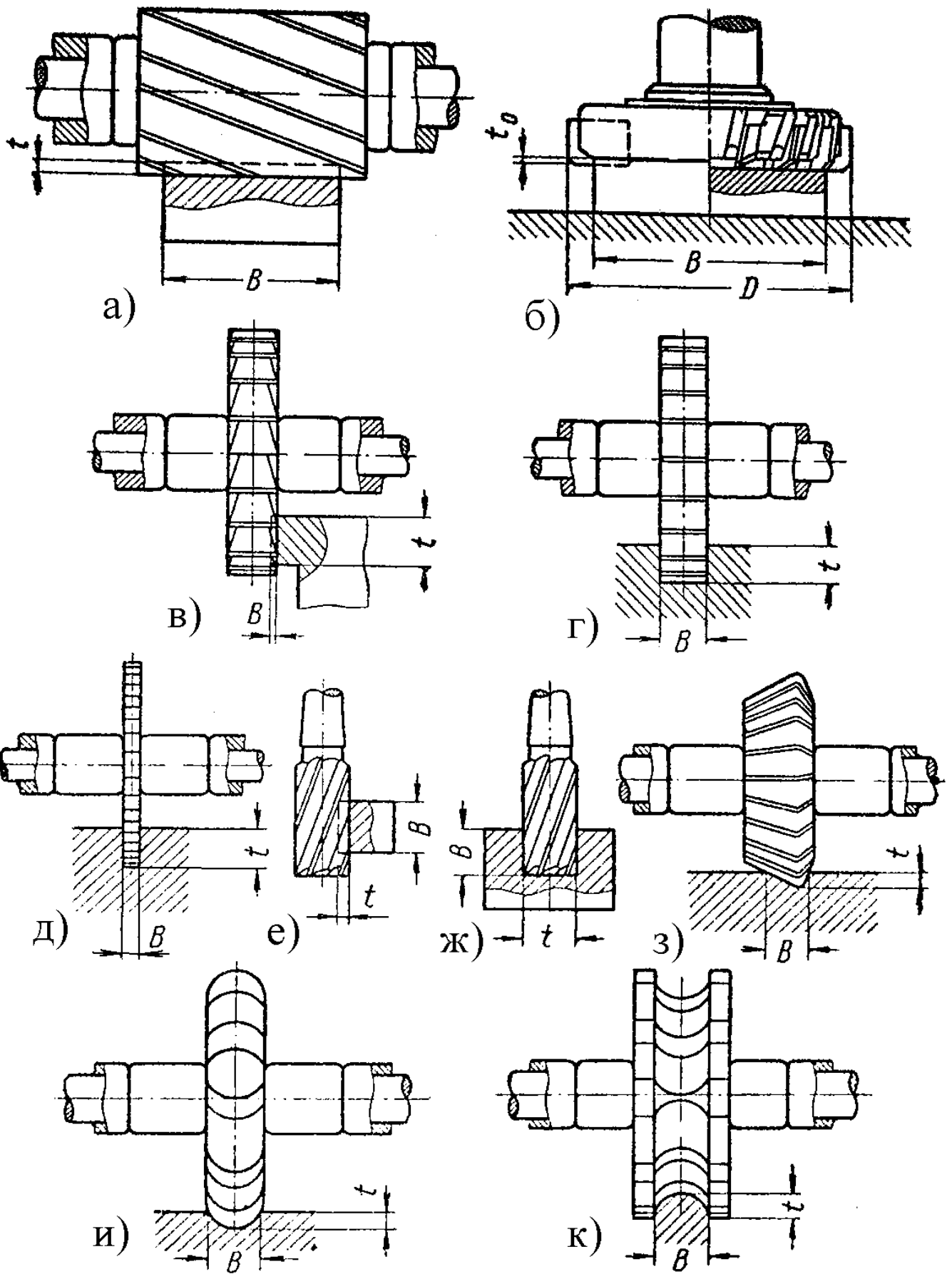


Рис. 52. Типы фрез

Режущие зубья фрезы могут быть расположены на поверхности тела вращения или на его торцевой плоскости. Каждый зуб фрезы представляет собой резец с соответствующей режущей кромкой, вращающейся вокруг оси фрезы. Зубья фрезы при вращении последовательно один за другим вступают в работу, снимая стружку определенного сечения.

В зависимости от направления вращения фрезы и направления подачи различают **встречное фрезерование**, когда деталь подается навстречу вращения фрезы (рис. 53, а) и **попутное фрезерование**, при котором направление подачи совпадает с направлением вращения фрезы (рис. 53, б). Наиболее широкое распространение получило встречное фрезерование. При этом методе работы в связи с изменением толщины среза нагрузка на каждый зуб фрезы постепенно возрастает и на выходе получает наибольшее значение. При попутном фрезеровании зуб фрезы начинает работать сразу с наибольшей толщины среза и подвергается максимальной нагрузке, которая постепенно снижается.

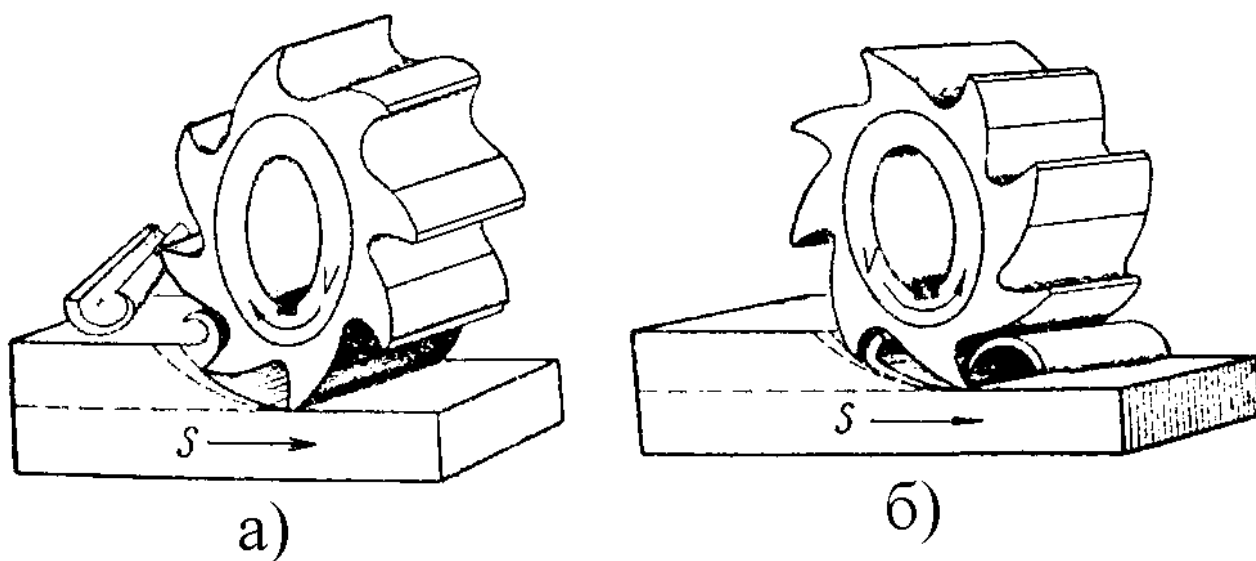


Рис. 53. Встречное и попутное фрезерование

При попутном фрезеровании заготовка прижимается к столу станка, в то время как при встречном фрезеровании силы распределяются так, что фреза как бы отрывает заготовку от стола.

Следует иметь в виду, что при попутном фрезеровании обработанная поверхность получается чище и, кроме того, расходуется меньше мощности при условии отсутствия твердой корки на обрабатываемом материале и при хорошем состоянии оборудования (отсутствие зазоров в винтовом сопряжении стола).

Фрезы можно классифицировать по следующим основным признакам:

1) конструкция режущих зубьев и способ их заточки – фрезы с остrokонечными зубьями, перетачиваемыми по задней поверхности и с затылованными зубьями, перетачиваемыми по передней грани;

2) форма и расположение режущих кромок относительно оси вращения инструмента – фрезы цилиндрические, дисковые, торцевые, концевые, угловые, фасонные (рис. 52);

3) направление зубьев к оси фрезы – фрезы прямозубые, винтовые, с наклонными зубьями;

4) способ крепления на станке – фрезы насадные с отверстием под оправку

и концевые с цилиндрическим или коническим хвостовиком;

5) конструкция фрезы – цельные и сборные со вставными зубьями, в том числе с напаянными или механически закрепляемыми режущими пластинами из твердого сплава или СТМ.

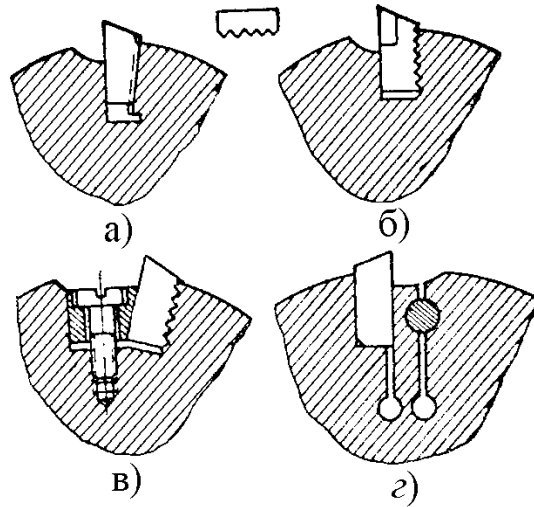


Рис. 54. Методы крепления зубьев фрезы: а – клином с радиальным рифлением; б – клином с осевым рифлением; в – клином с винтом; г – зажим штифтом.

В целях рационального использования инструментальных материалов (пластинок, оснащенных твердым сплавом, быстрорежущей стали) широко применяют сборные конструкции фрез со вставными зубьями. Сборные фрезы имеют корпус, изготовленный из конструкционной стали, а зубья (ножи) — из быстрорежущей стали, или вставные зубья оснащают пластинками твердого сплава. Существует много способов крепления вставных зубьев в корпусе фрезы. На рис. 54 показаны некоторые методы крепления зубьев фрезы.

Цилиндрические фрезы применяются главным образом для обработки плоскостей. Цилиндрические прямозубые фрезы применяются в настоящее время редко. Цилиндрические фрезы с винтовым зубом получили широкое распространение, они работают более спокойно благодаря плавному входу и выходу зубьев. К недостаткам этих фрез надо отнести возникновение осевых усилий в процессе резания. Фрезы изготавливаются диаметром $D = 40 \div 90$ мм и длиной $B = 30 \div 150$ мм (фиг. 55, а). Изготавливают цилиндрические фрезы также и со вставными ножами (фиг. 55, б).

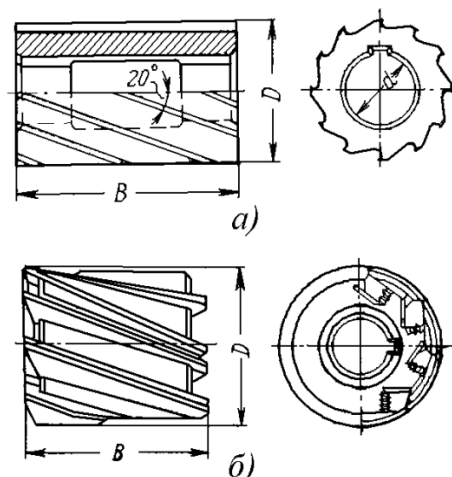


Рис. 55. Цилиндрические фрезы: а – с мелким зубом; б – со вставными ножами.

Диаметр фрез $D = 60 \div 200$ мм и ширина $B = 50 \div 150$ мм. Угол наклона винтовых канавок $\omega = 20^\circ$ и для фрез с крупным зубом для тяжелых работ доходит до $30 - 45^\circ$.

Применяют также и составные цилиндрические фрезы для фрезерования плоскостей (рис. 56). Такие фрезы изготавливаются диаметром $D = 75 \div 200$ мм и длиной $B = 75 \div 300$ мм. Составная конструкция может состоять из двух-шести корпусов, одновременно выполняющих обработку широких плоскостей.

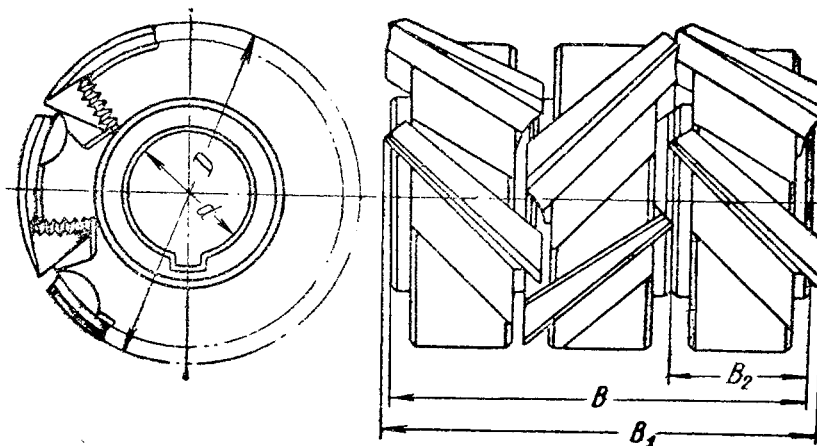


Рис. 56. Цилиндрическая составная сборная фреза

Составные фрезы изготавливаются в большинстве случаев со вставными ножами, укрепленными в корпусе фрезы. Крепление ножей обычно производится с помощью осевого клина и призматических ножей, имеющих на опорной стенке рифление.

Дисковые фрезы применяются для фрезерования пазов, канавок и выемок.

Дисковая пазовая фреза имеет зубья только на цилиндрической поверхности; изготавливается диаметром $D = 60 \div 90$ мм и шириной $B = 5 \div 16$ мм (рис. 57, а).

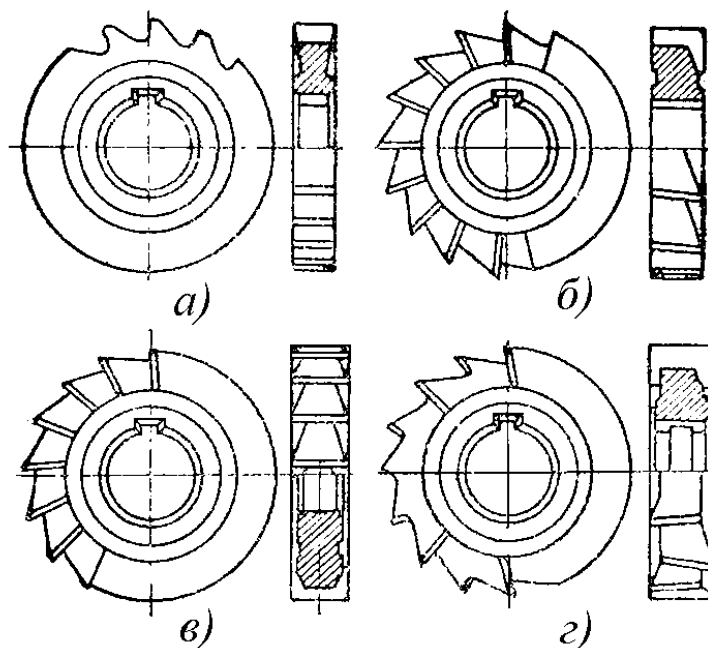


Рис. 57. Дисковые фрезы: а – пазовая; б – дисковая; в – трехсторонняя; г – с переменным наклонным зубом.

Двухсторонние и трехсторонние дисковые фрезы изготавливаются с режущими зубьями не только на цилиндрической поверхности, но и на торцевой.

Двухсторонняя фреза представлена на рис. 57, б.

Трехсторонние фрезы имеют зубья на обоих торцах (рис. 57, в). Режущие кромки на цилиндрической поверхности выполняют основную работу резания, а режущие кромки, расположенные на торцах, зачищают стенки фрезеруемой канавки.

Трехсторонние дисковые фрезы изготавливаются диаметром $D = 60 \div 110$ мм, шириной $B = 6 \div 16$ мм и имеют от 16 до 22 зубьев. Применяются также трехсторонние фрезы со вставными ножами из быстрорежущей стали диаметром $D = 75 \div 250$ мм и шириной $B = 12 \div 40$ мм.

Часто используют при фрезеровании пазов фрезы с переменным наклоном зубьев (фиг. 57, г). На цилиндрической поверхности такой фрезы имеются косые зубья с противоположным наклоном. Торцевые зубья заточены через один, и их количество в 2 раза меньше числа зубьев на цилиндрической поверхности.

Для прорезания узких канавок и пропилов в головках винтов, шурупов и т. д. применяются более тонкие прорезные (шлицевые) фрезы диаметром $D = 40 \div 75$ мм и шириной $B = 0,2 \div 5$ мм, с мелким зубом $z = 72 \div 120$ и с укрупненным $z = 40 \div 72$ (рис. 58). Фрезы с мелким зубом применяются для прорезки неглубоких шлицев, узких щелей и разрезки тонких заготовок; фрезы с укрупненным зубом используются для прорезки глубоких пазов.

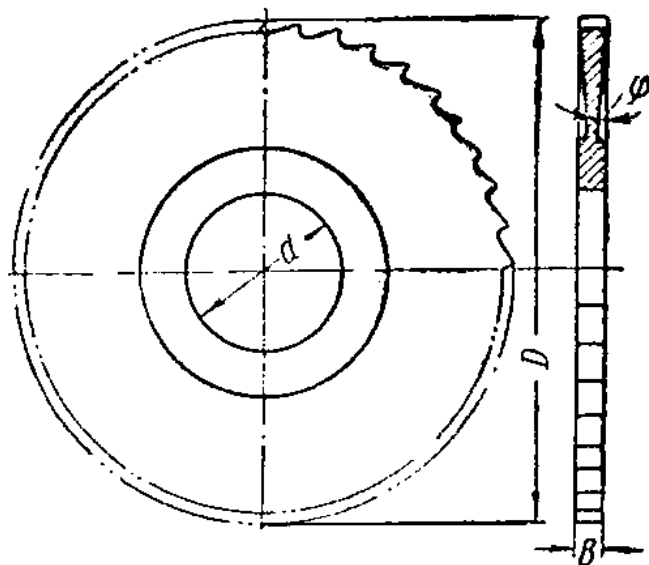


Рис. 58. Прорезная (шлицевая) фреза

Для уменьшения трения по торцам и облегчения процесса резания сбоку зуб имеет вспомогательный угол в плане $\phi_1 = 30' - 1^\circ$.

Для резания металлов на горизонтально-фрезерных станках применяются фрезы отрезные (пилы круглые) диаметром $D = 60 \div 200$ мм и шириной $B = 1 \div 5$ мм, аналогичные прорезным фрезам.

Угловые фрезы применяются для фрезерования канавок углового профиля главным образом на поверхности различных режущих инструментов (развертки, зенкера, фрезы).

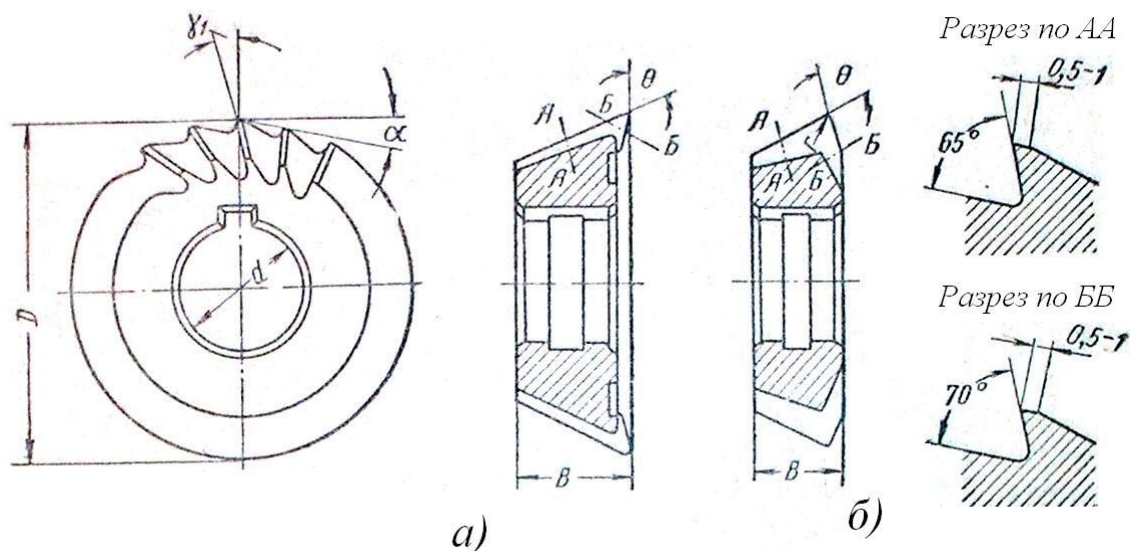


Рис. 59. Угловые фрезы: а – одноугловая; б – двухугловая, несимметричная.

Угловые фрезы разделяют на одноугловые (рис. 59, а), двухугловые несимметричные (фиг. 59, б) и симметричные. Одноугловые фрезы имеют угол 55, 60, 65, 70, 80, 85 или 90°.

Зубья угловых фрез расположены на конических поверхностях.

Двухугловые несимметричные фрезы отличаются от симметричных тем, что углы профиля правой и левой сторон делаются различными.

Концевые или пальцевые фрезы (рис. 60, а) в отличие от цилиндрических и торцовых крепятся в станке при помощи цилиндрического или конического хвостовика, вставляемого в шпиндель станка или в отверстие зажимного патрона.

Зубья расположены как на цилиндрической, так и на торцовой поверхности фрез.

Концевые фрезы применяются для обработки угловых профилей, различных пазов и фасонных поверхностей по копиру.

В настоящее время широко используются разношаговые фрезы. Отличительной особенностью данных фрез является неравномерный окружной шаг зубьев и уменьшенное число зубьев фрезы до 3—6.

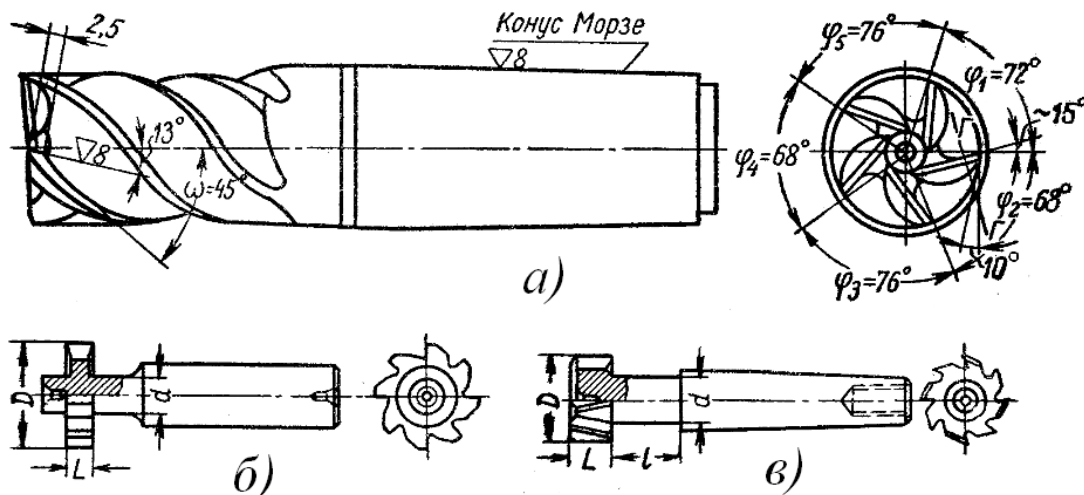


Рис. 60. Типы фрез: а – концевая, разношаговая фреза; б – для пазов под сегментные шпонки; в – Т-образные пазовые.

Фрезы изготавливаются как с нормальным зубом ($z = 4 \div 6$), так и с крупным зубом ($z = 3 \div 4$). Зубья фрезы на цилиндрической части имеют винтовую форму с углом наклона стружечных канавок $\omega = 30 \div 45^\circ$. Фрезы изготавливаются с цилиндрическим хвостовиком для диаметров от 3 до 20 мм и с коническим хвостовиком от 16 до 50 мм.

Неравномерный шаг зубьев значительно снижает вибрации, особенно при больших подачах, что существенно улучшает чистоту обработки.

Неравномерность окружного шага (центральный угол φ) составляет: при $z=3$ $\varphi_1=110^\circ$; $\varphi_2=123^\circ$ и $\varphi_3=127^\circ$; при $z=4$ $\varphi_1=90^\circ$; $\varphi_2=85^\circ$; $\varphi_3=90^\circ$ и $\varphi_4=95^\circ$; при $z=5$ $\varphi_1=72^\circ$; $\varphi_2=68^\circ$; $\varphi_3=76^\circ$; $\varphi_4=68^\circ$ и $\varphi_5=76^\circ$.

Уменьшение числа зубьев фрезы обеспечивает большую прочность зуба, а увеличение угла наклона винтового зуба до $\omega = 45^\circ$ облегчает отвод стружки.

Разношаговые фрезы с успехом применяются для обработки различных материалов, а повышенная прочность зубьев, неравномерный шаг и большой угол наклона зубьев позволяют работать на повышенных режимах резания, что создает условия повышения производительности труда почти вдвое.

Концевые фрезы изготавливаются с неравномерным шагом между зубьями и $\omega = 30 \div 45^\circ$.

Применяются также концевые шпоночные фрезы для обработки на валах сегментных шпоночных канавок (рис. 60, б); $D = 7,5 \div 41$ мм; $L = 1,5 \div 10$ мм и концевые Т-образные фрезы для станочных Т-образных пазов под головки болтов (рис. 60, в); $D = 17,5 \div 93$ мм; $L = 7,5 \div 40$ мм.

Торцовые фрезы могут быть цельными, насадными и со вставными зубьями. Эти фрезы применяются для фрезерования плоскостей зачастую больших размеров. Диаметр торцовой фрезы выбирается в зависимости от ширины фрезеруемой плоскости B примерно в следующем соотношении: $D = (1,5 \div 1,6)B$.

Торцовые насадные фрезы изготавливаются с мелким зубом ($z=12 \div 22$) диаметром $D=40 \div 110$ мм и с крупным зубом диаметром $D=60 \div 110$ мм.

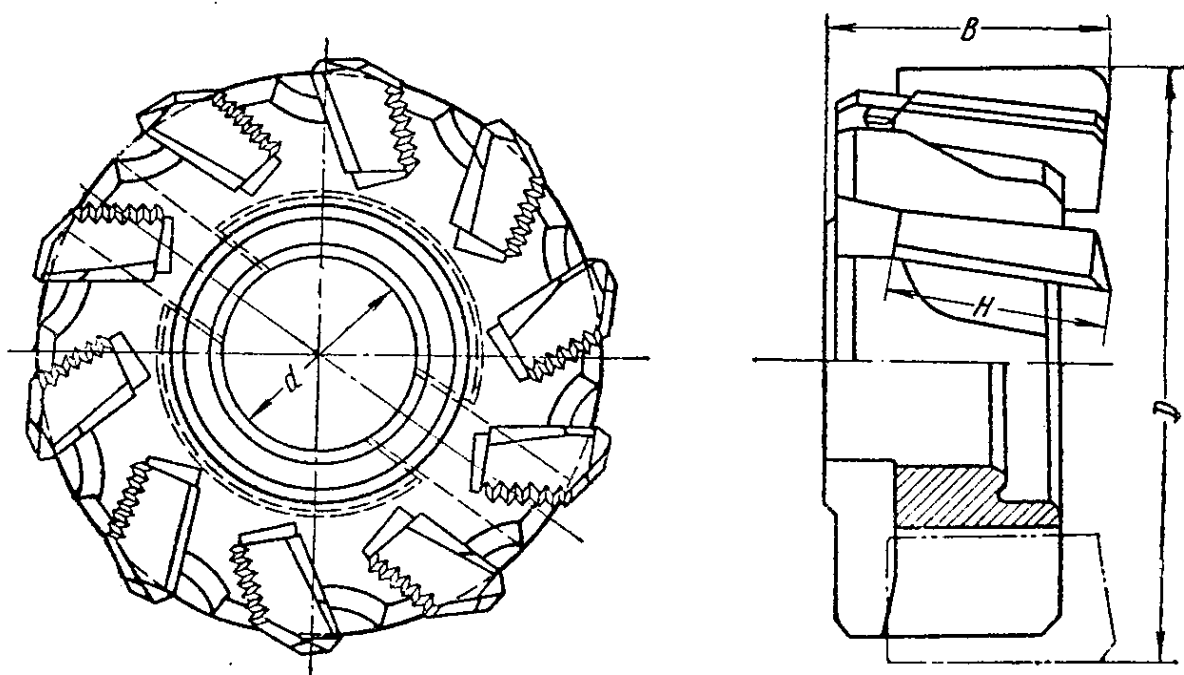


Рис. 61. Торцовая фреза со вставными зубьями

Фрезы имеют, кроме торцовых зубьев, также и режущие зубья на цилиндрической части. Фрезы с мелкими зубьями применяются для чистовых и получистовых работ; для грубых обдирочных и черновых работ применяются фрезы с крупным зубом.

Широко применяются торцовые фрезы со вставными ножами из быстрорежущей стали (рис. 61) диаметром $D=80\div 250$ мм. Крепление ножей в корпусе фрезы клиновое с рифлением.

Ступенчатые фрезы. При снятии больших припусков за один проход применяют метод ступенчатого фрезерования. Особенность этого метода заключается в том, что полная глубина резания при применении торцовой ступенчатой фрезы распределяется на несколько ступеней (рис. 62). Каждый зуб фрезы снимает слой металла определенной глубины. Такие фрезы производительны в работе, менее склонны к вибрации, дают чистую обработанную поверхность и потребляют меньшую мощность.

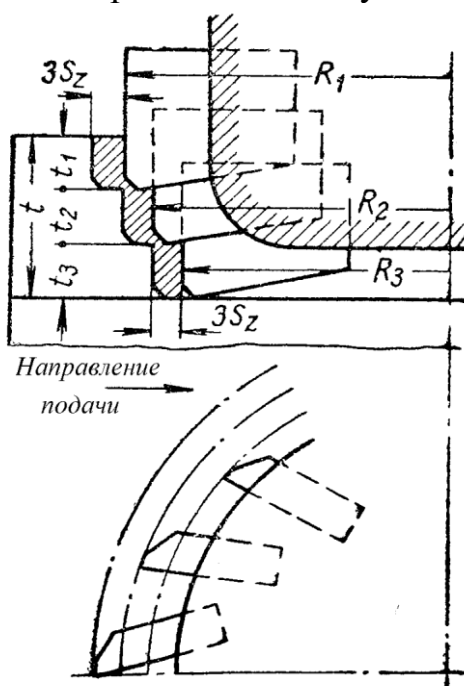


Рис. 62. Схема обработки ступенчатой фрезой

Ступенчатые фрезы по сравнению с обычными торцовыми фрезами имеют более сложную заточку.

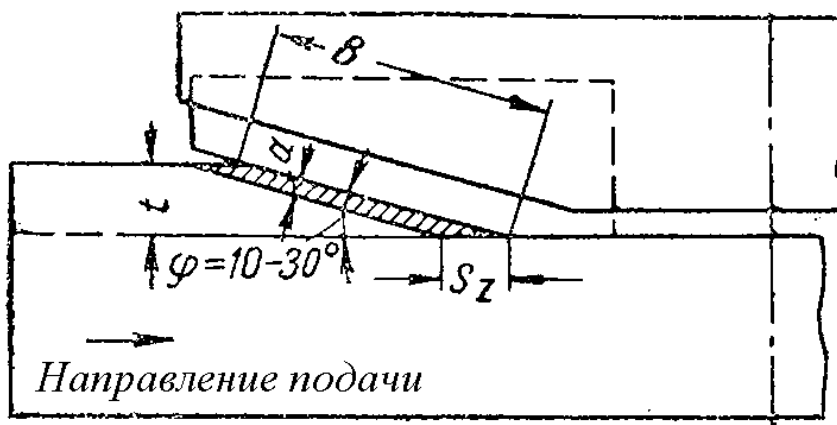


Рис. 63. Схема работы торцово-конической фрезы

Как разновидность конструкции торцовых фрез можно привести конструкцию торцово-конических фрез, представляющих собой как бы ступенчатую фрезу с большим количеством ступеней (рис. 63). Главная режущая кромка имеет угол в плане $\varphi=10\div 30^\circ$. Уменьшение толщины среза при малом угле в плане Φ позволяет увеличить подачу на зуб, а следовательно, сокращает время обработки деталей.

Двухкромочные торцовые фрезы. В автомобилестроении применяют двухкромочные фрезы (рис. 64). Каждый зуб такой фрезы имеет две главные режущие кромки ab и $вz$, между которыми расположена вспомогательная торцовая кромка $бв$.

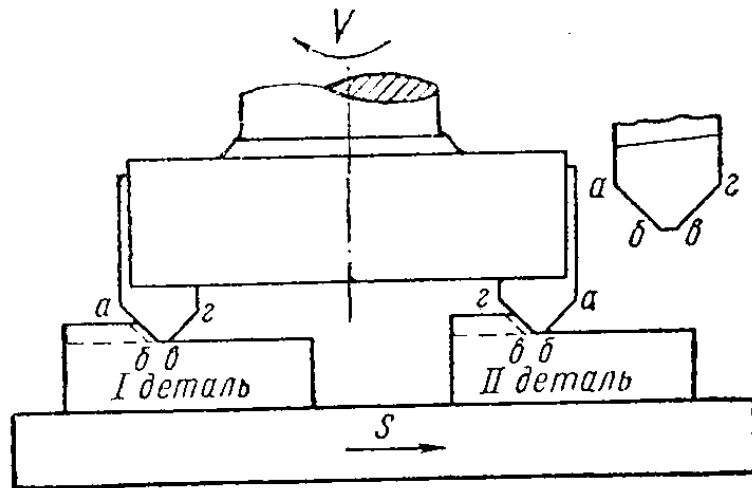


Рис. 64. Схема работы двухкромочной торцовой фрезы

Такая фреза допускает обработку одновременно двух деталей, благодаря чему повышается производительность труда примерно в 2 раза.

Наружная главная режущая кромка зуба обрабатывает первую деталь, а внутренняя кромка $вz$ – вторую деталь.

Снятие стружки происходит одновременно с двух поверхностей деталей, расположенных последовательно.

Фасонные фрезы служат для обработки поверхностей сложного, в большинстве случаев криволинейного профиля. Фасонные фрезы имеют зубья, затылованные по кривой, что обеспечивает постоянство их профиля при переточках по передней поверхности. Фрезы с затылованным зубом в зависимости от характера обрабатываемой детали встречаются различных типов.

К фасонным фрезам относятся полукруглые выпуклые и вогнутые фрезы, фрезы для обработки канавок спиральных сверл, метчиков и других инструментов.

Профиль зуба таких фрез должен соответствовать профилю фрезеруемой канавки.

На рис. 65 представлены полукруглые фасонные фрезы — выпуклая и вогнутая (a и b); фасонная фреза для обработки профиля канавок метчиков ($в$).

Заточка затылованных фасонных фрез производится только по передней поверхности.

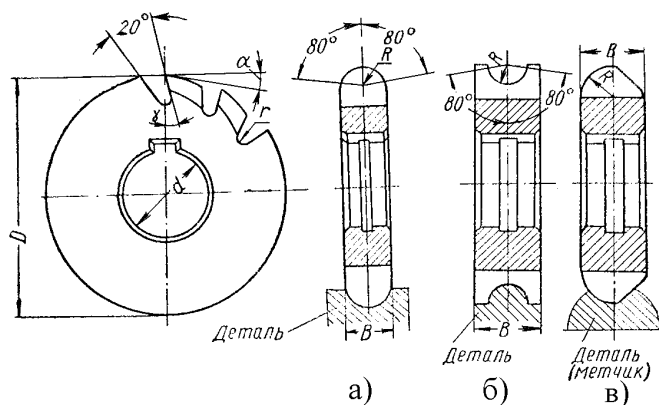


Рис. 65. Фасонные фрезы: а – полукруглая выпуклая; б – полукруглая вогнутая; в – для обработки канавок метчиков

Для одновременной обработки широких поверхностей или сравнительно широкого фасонного профиля применяют составные фрезы, состоящие из отдельных простых фрез (рис. 66). В этом случае сложный профиль, состоящий из прямолинейных и криволинейных участков, расчленяется на отдельные элементы, состоящие из простых профилей.

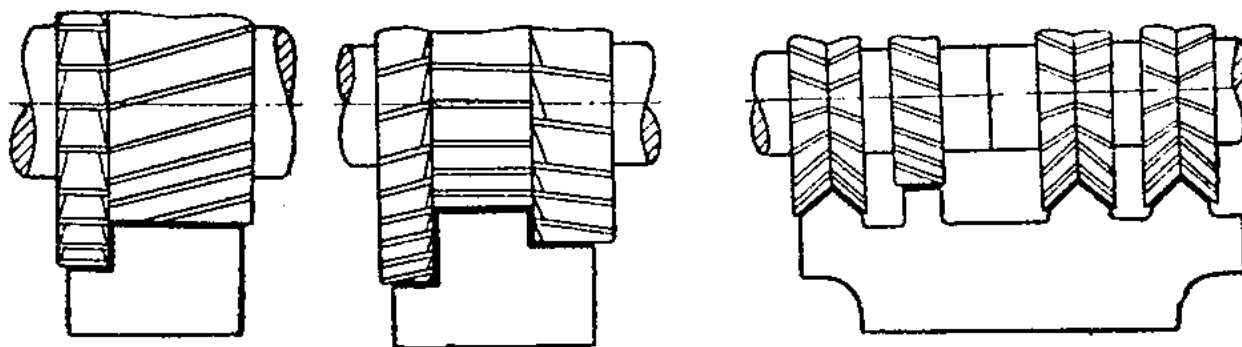


Рис. 66. Составные фрезы

Такая обработка деталей, с использованием сборных фрез, применяется в технологии современного массового производства, обеспечивая высокую производительность процесса фрезерования.

Фрезы, оснащенные твердым сплавом. При скоростном фрезеровании в качестве режущего инструмента применяют различные типы фрез, оснащенных твердым сплавом.

Фреза состоит из корпуса и вставных ножей, оснащенных на режущей части пластинками твердых сплавов.

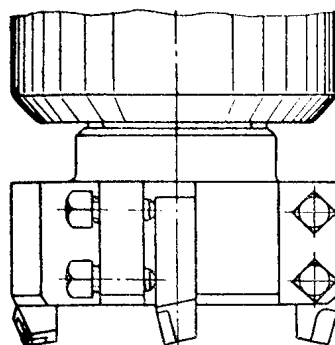


Рис. 67. Фреза, оснащенная твердым сплавом, с крепление зубьев винтами

Наиболее широкое распространение при скоростном фрезеровании получили торцовые фрезы, оснащенные твердым сплавом как с положительным, так и с отрицательным передними углами. На рис. 67 приведена фреза, оснащенная твердым сплавом, с креплением зубьев с помощью винтов. Зубья фрезы оснащаются пластинками твердого сплава Т5К10 при обдирочных работах по стали и Т15К6 при получистовых и чистовых операциях. Для обработки чугуна применяют пластинки твердого сплава ВК8 и ВК6. Большое распространение получили торцовые фрезы со вставными ножами, оснащенными твердым сплавом диаметром $D=100\div 630$ мм.

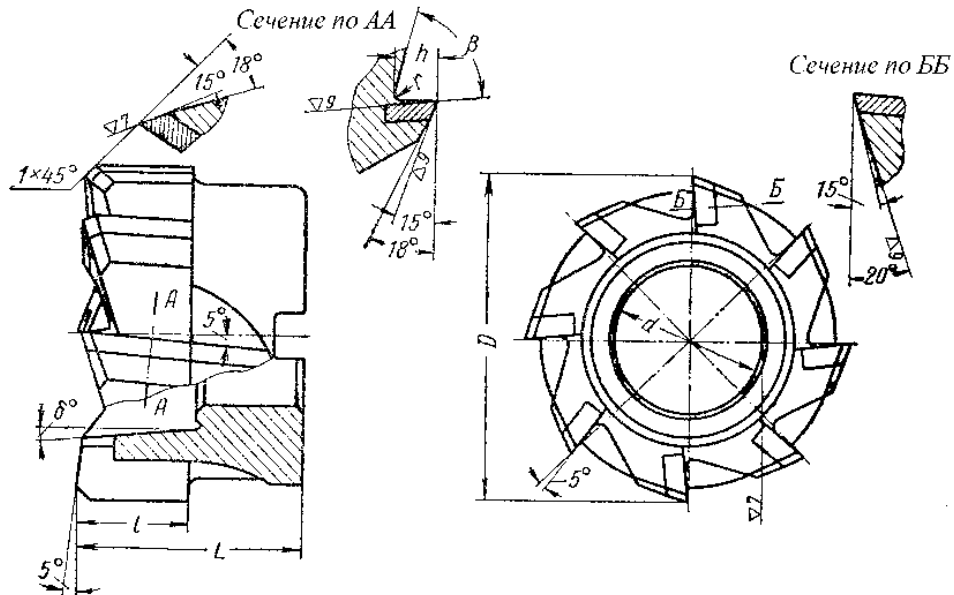


Рис. 68. Торцовая фреза с напаянными пластинами твердого сплава

На рис. 68 показана конструкция торцовой насадной фрезы с напаянными пластинами твердого сплава.

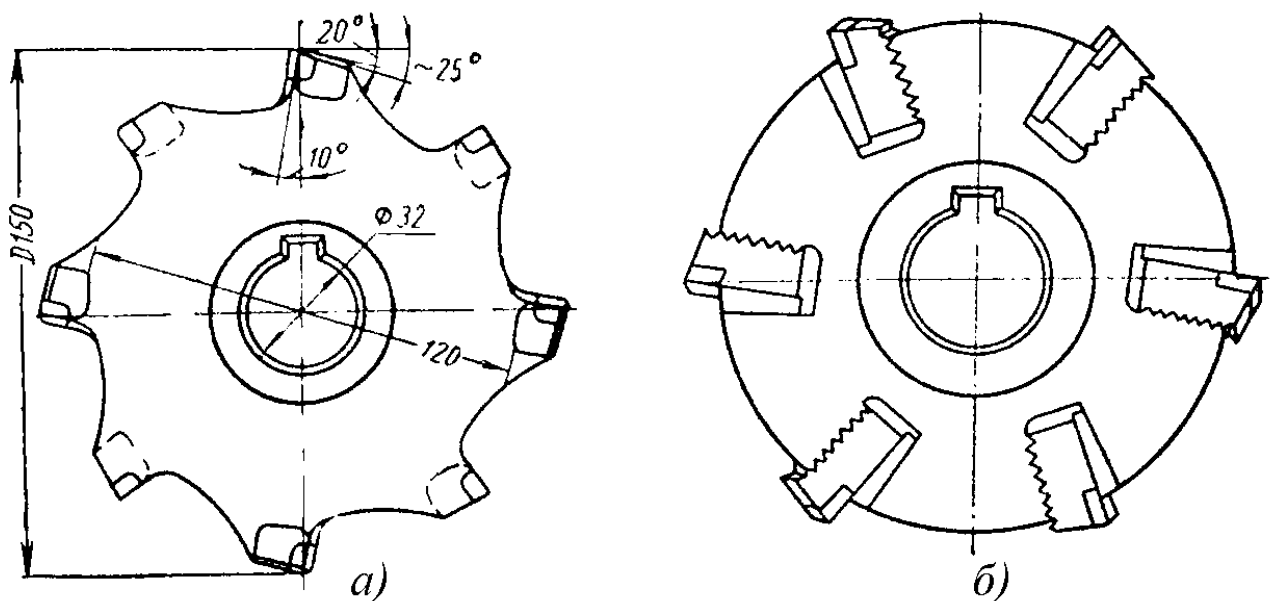


Рис. 69. Дисковая фреза: а - с напаянными твердосплавными пластинами; б - со вставными зубьям.

Дисковые фрезы с напаянными пластинами твердого сплава (рис. 69, а) применяются главным образом для фрезерования узких и глубоких пазов, так

Если зубья прямые, то главная секущая плоскость будет перпендикулярна к оси фрезы (рис. 70, а); для фрез с винтовыми зубьями углы измеряются в плоскости $A-A$, перпендикулярной к режущей кромке (рис. 70, б).

Передний угол служит для облегчения схода стружки, для уменьшения пластической деформации срезаемого слоя и для уменьшения трения стружки о переднюю поверхность зуба. Для цилиндрических, торцовых, концевых и дисковых фрез передний угол практически берется в пределах $\gamma = 10 \div 20^\circ$; для более твердого материала выбирается меньшее значение, а для более мягкого — большее значение угла γ .

У фрез с пластинками из твердых сплавов по аналогии с резцами, оснащенными твердым сплавом, при обработке твердой стали передний угол делают отрицательным: $\gamma = -10 \div -15^\circ$.

Задний угол α служит для уменьшения трения между задней поверхностью зуба и поверхностью резания. Для цилиндрических и торцовых фрез $\alpha = 12 \div 16^\circ$, для дисковых $\alpha = 12 \div 20^\circ$, для концевых и угловых $\alpha = 16 \div 20^\circ$ и для фасонных $\alpha = 12 \div 16^\circ$.

Чем больше задний угол, тем меньше трение, следовательно, меньше и износ зуба. Однако с увеличением заднего угла прочность зуба снижается и ухудшается отвод тепла от режущей кромки.

Геометрические параметры режущей части торцовой фрезы показаны на рис. 70, в.

Геометрию зуба определяют следующие углы: α — главный задний угол; γ — главный передний угол; γ_1 — поперечный передний угол; α_n — задний нормальный угол; φ — главный угол в плане; φ_1 — вспомогательный угол в плане; α_1 — торцовый задний угол; ω — угол наклона винтовой канавки.

Главный передний угол γ измеряется в плоскости $A-A$, нормальной к главной режущей кромке (рис. 70, в). Передний угол γ_1 , измеренный в плоскости торца $G-G$, т.е. в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, называется передним поперечным углом.

Главный задний угол α рассматривается в плоскости $G-G$, нормальной к оси фрезы. При рассмотрении заднего угла в плоскости $A-A$, нормальной к главной режущей кромке, получаем α_n — задний нормальный угол.

Задний торцовый угол α_1 измеряется в плоскости $B-B$, нормальной к вспомогательной режущей кромке. Величина угла $\alpha_1 = 6 \div 8^\circ$.

Для повышения стойкости фрезы и упрочнения зуба делают переходную кромку шириной $f_0 = 1 \div 2$ мм под углом φ_0 , называемым углом в плане переходной кромки.

Главный угол в плане φ влияет на толщину срезаемого слоя, качество поверхности и на соотношение составляющих сил, действующих на зуб фрезы. С увеличением угла φ увеличивается толщина среза при одной и той же подаче.

Угол φ выбирается в пределах $20-90^\circ$. Наиболее часто встречаются фрезы с углом $\varphi = 45 \div 60^\circ$. Фрезы с углом $\varphi = 20 \div 30^\circ$ рекомендуются при обработке жестких деталей и глубине резания не больше 5 мм.

Вспомогательный угол в плане φ_1 , служащий для уменьшения трения между вспомогательной режущей кромкой и обработанной поверхностью, выбирается для фрез с торцовыми зубьями в пределах $1-8^\circ$. Угол наклона винтовой канавки

ω служит для создания более спокойных условий резания и повышения равномерности процесса фрезерования. Наличие угла наклона зуба уменьшает вибрации и обеспечивает более спокойный процесс снятия стружки, так как режущая кромка каждого зуба фрезы входит в обрабатываемую деталь не сразу, а постепенно. Направление винтовых зубьев фрезы (правое или левое) выбирается так, чтобы осевая составляющая силы резания была направлена на шпиндель станка, где имеется опора для ее воспринятая.

Угол наклона ω винтовых зубьев выбирается в зависимости от конструкции и назначения фрезы в пределах $10—50^\circ$.

Конструкции зубьев фрез. Их достоинства и недостатки

По конструкции зубьев фрезы делятся на две большие группы: с остроконечными и с затылованными зубьями (рис. 71). Первые иногда неправильно называют фрезами с острозаточенными зубьями, в то время как фрезы с затылованными зубьями также затачивают доостра. Принципиальные же различия этих фрез заключаются в способе заточки, форме и количестве зубьев, трудоемкости изготовления, стойкости, производительности и качестве обработанной поверхности.

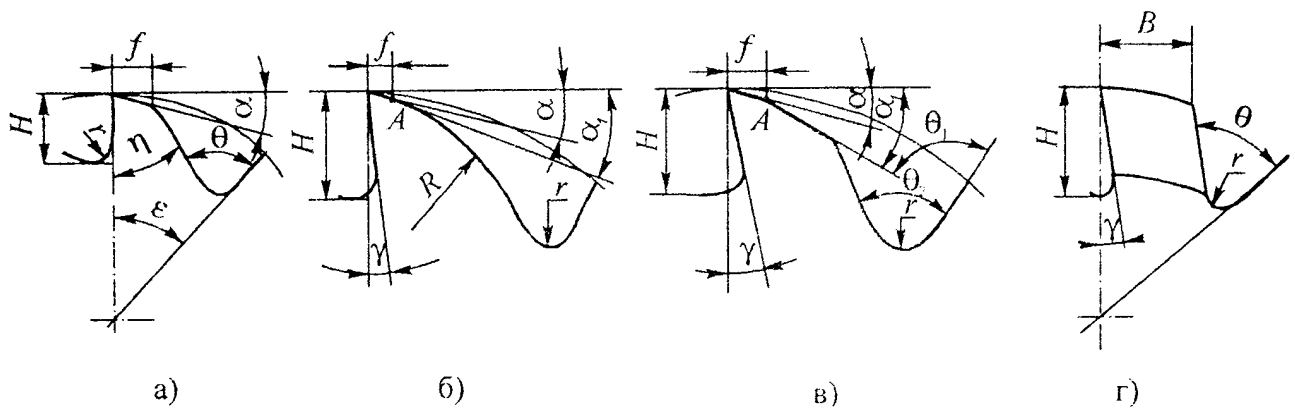


Рис. 71. Форма зубьев фрез: а – трапецевидная; б – параболическая; в – усиленная; г – затылованный зуб.

Процесс фрезерования характеризуется снятием тонких стружек переменной толщины. Переточка остроконечных зубьев по задней поверхности, где в основном сосредоточен износ при фрезеровании, позволяет уменьшить припуск на переточку, увеличить срок службы фрезы, уменьшить объем зубьев и главное – увеличить их число z , от которого пропорционально зависит производительность процесса фрезерования. Последняя определяется в основном минутной подачей, которая равна

$$S_M = S_z z n,$$

где S_z - подача на один зуб;

z - число зубьев;

n - число оборотов фрезы в минуту.

При увеличении числа зубьев фрезы снижается шероховатость обработанной поверхности и уменьшается неравномерность процесса резания.

Форма зубьев фрез должна быть такой, чтобы:

1) обеспечивалась необходимая прочность зуба;

- 2) допускалась возможность большего количества переточек;
- 3) объем канавок между зубьями был достаточным для размещения стружки.

На практике получили распространение три формы остроконечных зубьев: 1) трапецевидная, 2) параболическая; 3) усиленная.

Трапецевидная форма (рис. 71, а) наиболее простая в изготовлении, но при этом зуб несколько ослаблен, поэтому имеет небольшую высоту и малый объем стружечной канавки. По мере переточки зуба по задней грани (фаска $f = 1...2\text{мм}$) его высота уменьшается и он становится более прочным. Однако такая форма зубьев допускает небольшое число переточек и применяется на фрезях для чистовой обработки. При этом число зубьев из-за их малого объема может быть максимально возможным. Канавки в таких фрезях изготавливают либо фрезерованием, либо вышлифовыванием эльборовыми или алмазными кругами в цельных заготовках на станках с ЧПУ.

Угол впадины θ между зубьями равен:

$$\theta = \eta + \varepsilon,$$

где η - угол остроты зуба ($\eta = 45...50^\circ$);

ε - угловой шаг зубьев ($\varepsilon = 360^\circ/z$).

Данная формула справедлива как для $\gamma = 0$, так и для $\gamma > 0$. В целях сокращения номенклатуры угловых фрез для фрезерования канавок значение угла θ берется в пределах от 45 до 110° (через 5°).

По приведенной выше формуле, задавшись углами η и ε , определяют угол θ и округляют его до ближайшего значения из ряда предпочтительных чисел. Для фрез с винтовыми зубьями их число z и угол ε корректируют (z^*) с учетом угла наклона зуба к оси фрезы ω :

$$z^* = \frac{z}{\cos^3 \omega}; \quad \varepsilon = \frac{2\pi}{z^*}.$$

Высоту зуба H можно найти по следующей формуле

$$H = \frac{d}{2} [(1 - \cos \varepsilon) + \sin \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \theta].$$

При переточке высота зуба уменьшается, поэтому суммарная стойкость таких фрез невелика, так как они допускают лишь $6...8$ переточек. Радиус впадины зуба берется равным $0,5...2,0$ мм.

Параболическая форма зуба (рис. 71, б) обладает наибольшей прочностью на изгиб, так как спинка зуба, оформленная по параболе, обеспечивает равнопрочность во всех сечениях по высоте зуба. Недостатком этой формы является необходимость для каждой высоты зуба иметь свою сложную фасонную канавочную фрезу. Поэтому с целью упрощения профиля спинки таких фрез параболу часто заменяют дугой окружности радиусом $R = (0,3...0,4)d$.

На передней поверхности зубьев параболической формы предусмотрен прямолинейный участок, от длины которого зависит количество переточек фрезы. Причем переточка допускается только по задней поверхности (фаска f). При этом задний угол α должен быть меньше угла α_1 на $10...15^\circ$ (α_1 – угол между касательной к параболе в точке A).

При несоблюдении этого условия в процессе переточки ширина ленточки будет сильно изменяться.

Усиленная форма зуба (рис. 71, в) применяется для тяжелых работ вместо параболической формы. Такой зуб имеет ломаную спинку, а также увеличенные толщину и высоту. Получают эти зубья двойным фрезерованием угловыми фрезами с углами $\theta = 28...30^\circ$ и θ_2 . Хотя при этом число операций увеличивается вдвое, такие зубья проще в изготовлении, чем параболические. Они имеют большой запас на переточку и высокую прочность. При этом используются стандартные канавочные фрезы с прямолинейными режущими кромками. При переточке зубья затачиваются по задней поверхности под углом α доостра с обязательным выхаживанием во избежание биения режущих кромок. Иногда оставляют небольшие цилиндрические ленточки шириной $f_{\text{л}} = 0,02...0,03$ мм, которые упрощают контроль биения зубьев фрезы.

Затылованный зуб (рис. 71, г) внешне отличается большей толщиной, а главное - формой задней поверхности, которая выполняется на специальной операции, называемой **затылованием**, с целью создания задних углов во всех точках режущих кромок. Достигается это за счет того, что радиальное сечение зуба, содержащее фасонный профиль, по мере поворота фрезы вокруг оси смещается в направлении к центру с помощью фасонного резца или шлифовального круга. Благодаря затылованию профиль режущей кромки зуба при переточках по передней грани во всех радиальных сечениях остается неизменным независимо от его сложности. Это является основным достоинством таких фрез наряду с весьма простой и нетрудоемкой по исполнению операцией переточки. Кроме того, зубья такой формы обладают высокой прочностью, а по мере переточки объем канавок для размещения стружки увеличивается, что благоприятно сказывается на работе фрезы. В то же время фрезы с затылованными зубьями имеют ряд существенных недостатков, главные из которых:

1. число зубьев у затылованных фрез значительно меньше, чем у фрез с остrokонечными зубьями. Это объясняется тем, что затылованные зубья имеют большую толщину, так как при переточке по передней поверхности приходится снимать большой припуск, чтобы избавиться от износа, который сосредоточен на задней поверхности зуба;

2. при переточке наблюдается большое радиальное биение зубьев, что приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности и снижению стойкости фрез;

3. у фрез с нешлифованным профилем зубьев после термообработки остаются обезуглероженные участки на задней поверхности, снижающие их стойкость;

4. остаточные термические напряжения могут вызывать искажение профиля режущих кромок фрезы.

Из-за этих недостатков фрезы с затылованными зубьями уступают по производительности и качеству обработанной поверхности фрезам с остrokонечными зубьями. Однако из-за простоты переточки они широко используются при обработке фасонных поверхностей.

Элементы режима резания при фрезеровании

Процесс фрезерования имеет целый ряд особенностей по сравнению с другими процессами резания. Процесс стружкообразования при фрезеровании осложняется целым рядом факторов. Если при работе резцом сечение стружки сохраняется постоянным во время всего прохода, то при фрезеровании сечение стружки (поперечное сечение среза) является величиной переменной.

Рассматривая схему работы цилиндрической фрезы с прямыми зубьями (рис. 72), видим, что работа каждого зуба происходит периодически и снятие стружки каждым зубом происходит только на сравнительно короткой дуге AC (большую часть каждого оборота зуб фрезы не производит работы резания). Зуб фрезы снимает стружку в виде заготовки, которая имеет переменную толщину a , изменяющуюся от нуля в начале врезания до максимального значения a_{max} при выходе зуба из обрабатываемой детали.

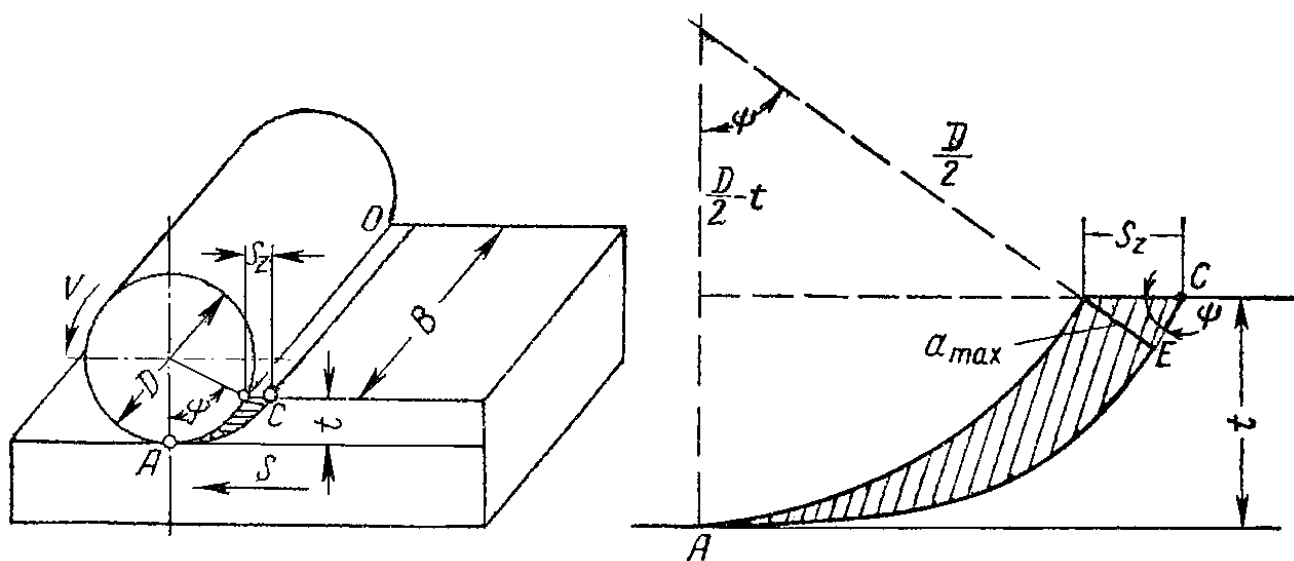


Рис. 72. Схема работы цилиндрической фрезы с прямыми зубьями

Периодичность работы зуба создает ударную нагрузку на режущую кромку, снижая тем самым стойкость фрезы.

Врезание каждого зуба фрезы в металл происходит не сразу; на некоторой длине дуги резания зуб скользит, не снимая стружку, вызывая сильное трение фрезы, образование тепла и последующее затупление зуба.

Процесс фрезерования характеризуется следующими факторами:

Скорость резания V — окружная скорость фрезы, измеренная по наибольшему диаметру, может быть вычислена по формуле

$$V = \frac{\pi D n}{1000} \quad \text{м/с} ,$$

где D — наружный диаметр фрезы в мм;

n — число оборотов фрезы в минуту.

Подача — перемещение обрабатываемой детали относительно фрезы при вращении последней.

При фрезеровании различают следующие подачи:

1) подачу на зуб фрезы S_z в мм/зуб;

2) подачу на один оборот фрезы S_0 в мм/об,

$$S_0 = S_z \cdot Z,$$

где z — число зубьев фрезы;

3) подачу за одну минуту (минутную подачу) S_M в мм/мин,

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

где n - число оборотов фрезы в минуту.

Глубина фрезерования t — толщина слоя металла, снимаемого с обрабатываемой детали за один проход фрезы.

Ширина фрезерования B — ширина обрабатываемой поверхности в направлении, параллельном к оси фрезы.

Ширина стружки b представляет собой длину линии соприкосновения зуба фрезы с обрабатываемой деталью, измеренную вдоль режущей кромки.

Для фрез с прямым зубом ширина фрезерования равна ширине стружки, т. е. $B = b$.

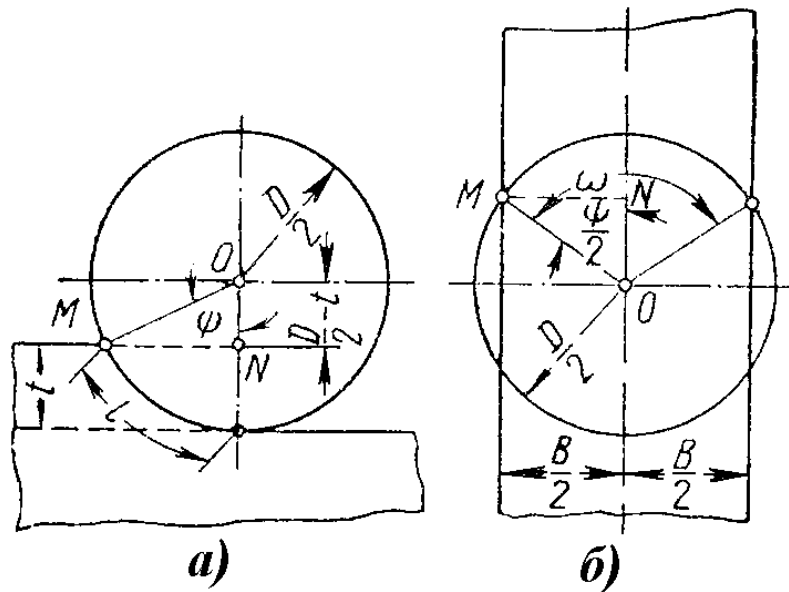


Рис. 73. Угол контакта при фрезеровании: а – для цилиндрической фрезы; б – для торцовой.

Угол контакта ψ — центральный угол, соответствующий дуге контакта фрезы с обрабатываемой деталью (рис. 73). Из треугольника OMN (рис. 73, а) можно написать для цилиндрических фрез

$$\cos \psi = \frac{\frac{D}{2} - t}{\frac{D}{2}} = \frac{D - 2t}{D}.$$

Для торцовых фрез при симметричном резании угол контакта (рис. 73, б) определяется по формуле

$$\sin \psi = \frac{\frac{B}{2}}{\frac{D}{2}} = \frac{B}{D},$$

где t — глубина фрезерования в мм;

D — диаметр фрезы в мм;

B — ширина фрезерования в мм.

Толщина стружки a при цилиндрическом фрезеровании является переменной величиной и измеряется в радиальном направлении (см. рис. 72, справа).

В момент входа зуба в деталь толщина стружки $a = 0$, и в момент выхода зуба из обрабатываемой детали толщина стружки имеет наибольшее значение, которое определяется из треугольника KCE :

$$a_{\max} = S_z \sin \psi.$$

Площадь поперечного сечения среза. При фрезеровании площадь поперечного сечения среза, снимаемая одним зубом, как и при других процессах резания, определяется по формуле

$$f = ab \text{ мм}^2.$$

В связи с тем, что в зависимости от положения зуба меняется толщина стружки a , то и сечение стружки будет величиной переменной.

На рис. 74 показано изменение поперечного сечения среза для фрез с прямым и винтовым зубом.

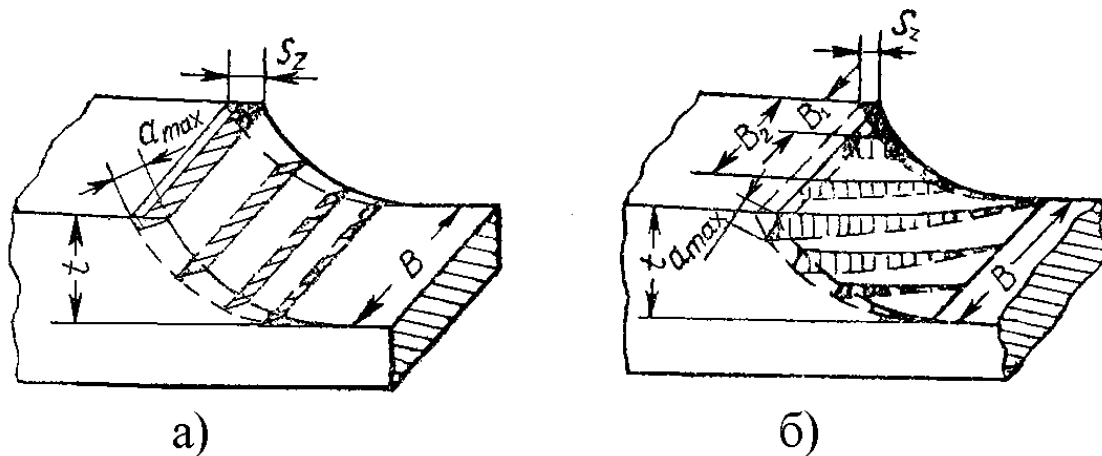


Рис. 74. Изменение площади поперечного сечения среза: а – у фрез с прямым зубом; б – со спиральным зубом.

Максимальное сечение стружки

$$f_{\max} = a_{\max} b = b S_z \sin \psi.$$

Из тригонометрии известно, что $\sin \psi = \sqrt{1 - \cos^2 \psi}$.

Подставляя в эту формулу значение $\cos \psi = \frac{D - 2t}{D}$, получим

$$\sin \psi = \sqrt{1 - \left(\frac{D - 2t}{D}\right)^2} = 2 \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}},$$

тогда

$$f_{\max} = b S_z \sin \psi = 2 b S_z \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}} \quad \text{и} \quad 2.$$

Так как в контакте находится не один зуб, а несколько зубьев фрезы, то приходится иметь дело с суммарным сечением среза, снимаемым несколькими одновременно работающими зубьями.

Суммарное сечение среза зависит от числа зубьев, одновременно находящихся в работе, и мгновенного угла контакта ($\psi_1, \psi_2, \psi_3 \dots$ и т. д.) для каждого зуба фрезы. На рис. 75 показана схема снятия стружки одновременно несколькими зубьями фрезы.

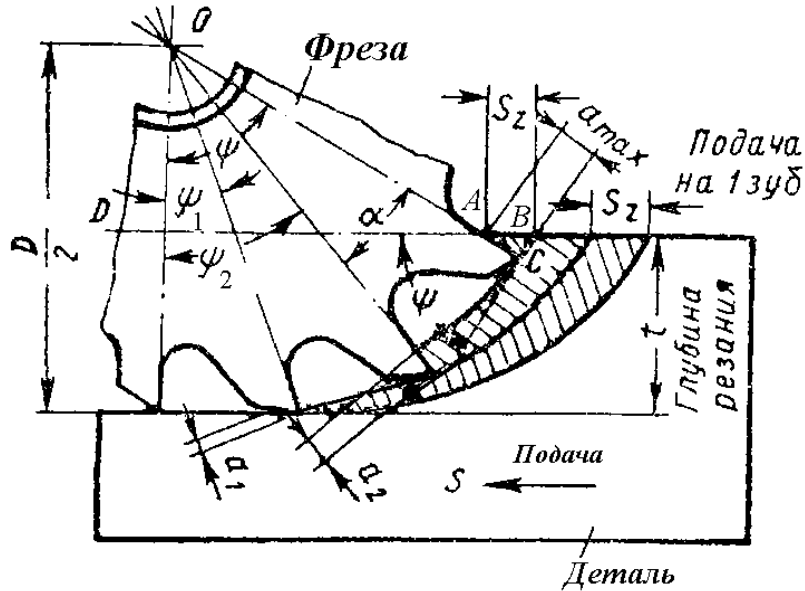


Рис. 75. Снятие стружки несколькими зубьями фрезы

Для фрезы с прямым зубом число одновременно работающих зубьев может быть определено по формуле

$$i = \frac{\psi}{\alpha}$$

Так как центральный угол между двумя соседними зубьями $\alpha = \frac{360^\circ}{z}$, то

$$i = \frac{\psi \cdot z}{360}$$

В случае, если число одновременно работающих зубьев будет дробным, его округляют до ближайшего целого числа. Если мгновенный угол контакта для каждого зуба равен $\psi_1, \psi_2, \psi_3 \dots$ и т. д., то площадь поперечного сечения среза будет:

$$\begin{aligned} \text{для первого зуба} & f_1 = b S_z \sin \psi_1; \\ \text{для второго зуба} & f_2 = b S_z \sin \psi_2; \\ \text{для третьего зуба} & f_3 = b S_z \sin \psi_3. \end{aligned}$$

Следовательно, суммарная площадь сечения среза, снимаемая всеми зубьями, находящимися в данный момент в работе, равна

$$f_{\text{сумм}} = f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n = b S_z (\sin \psi_1 + \sin \psi_2 + \dots + \sin \psi_n).$$