

Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов

МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Учебник

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и специальностям: «Технология машиностроения», «Металлообрабатывающие станки и комплексы», «Инструментальные системы машиностроительных производств» (направление подготовки дипломированных специалистов - «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»)



Издательство Томского университета
2003

УДК 621.9.02 (075.8)
ББК 34.63-5 я 73
К58

Кожевников Д.В., Кирсанов С.В.

Металлорежущие инструменты: Учебник. - Томск: Изд-во Том.
К58 ун-та, 2003,-392 с.: ил.

ISBN 5-7511 - 1709-3

Рассмотрены вопросы проектирования основных видов металлорежущих инструментов и оптимизации их конструктивных и геометрических параметров. Описаны современные конструкции режущих инструментов, изложены тенденции их развития с учетом отечественного и мирового опыта.

Для студентов машиностроительных специальностей вузов.

УДК 621.9.02 (075.8)
ББК 34.63-5 я 73

Рецензенты:

В.В. Клепиков - д-р т.н., проф. кафедры «Технология и металлорежущие системы автомобилестроения» Московского государственного индустриального университета, В.А. Рогов — д-р т.н., проф., зав. кафедрой «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Российского университета дружбы народов

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета Томского политехнического университета

Введение

В учебнике рассмотрены вопросы расчета и конструирования основных видов лезвийных металлорежущих инструментов, оптимизации их конструктивных и геометрических параметров, обеспечивающих повышение производительности и точности обработки деталей машин и механизмов. При анализе конструкций режущих инструментов основное внимание обращается на достоинства и недостатки инструментов, тенденции их развития с учетом мирового опыта и достижений практики в настоящее время.

Излагаемый материал базируется на сведениях, полученных студентами после изучения смежных дисциплин: материаловедения, сопротивления материалов, теории механизмов и машин, теории резания металлов, основ стандартизации и взаимозаменяемости. Использование знаний по этим дисциплинам позволило авторам сократить, например, раздел «Материалы, применяемые при изготовлении режущих инструментов», а раздел «Абразивные инструменты» исключить вообще.

С учетом часов, отводимых в новых учебных планах на специальные дисциплины, авторы стремились максимально сократить справочные материалы и упростить изложение сложных теоретических исследований. Все многообразие конструкций режущих инструментов сведено к таким основным видам, как резцы, протяжки, сверла, зенкеры, развертки, расточные и комбинированные инструменты, фрезы, резьбообрабатывающие инструменты, зуборезные инструменты и инструменты для автоматизированного производства. При этом наиболее подробно рассмотрены инструменты, широко применяемые на практике, и особенно инструменты, разработанные в последние годы.

Порядок изложения разделов принят с учетом многолетней установившейся практики чтения этого курса* в Томском политехническом

* Тихонов Т.И. Холодная обработка металлов. Лекции, читанные студентам IV курса Томского Технологического Института в 1903/4 году. Съ атласомъ. - Томскъ: Паровая Типо-Литографія П.И.Макушина, 1904. -467 с.

университете (ТПУ). В гл. 1 приведены общие сведения по всем видам инструментов.

В гл. 3 наибольшее внимание уделено расчету протяжек прогрессивной конструкции с групповой схемой резания.

В гл. 4 представлены результаты исследований кафедры «Технология машиностроения, резание и инструменты» ТПУ по геометрии спиральных сверл и инструментам для обработки глубоких отверстий, не получившие отражения в ранее изданных учебниках и учебных пособиях.

В гл. 8 дано более подробное описание конструкций фрез, оснащенных твердосплавными сменными многогранными пластинами, они нашли широкое применение как в нашей стране, так и за рубежом.

Наибольший объем приходится на разделы, посвященные расчетам резцообразующих и зуборезных инструментов, которые весьма сложны по своему устройству и довольно трудно осваиваются при изучении данной дисциплины.

При написании учебника были критически проанализированы и частично использованы материалы из учебников, учебных пособий, справочников, методических материалов и различных публикаций по отдельным видам режущих инструментов.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ

Режущие инструменты – это орудия производства, конечная составная часть металлорежущих станков, находящаяся в контакте с обрабатываемой заготовкой. Их предназначение – снятие припуска и формирование поверхности и размеров детали в соответствии с техническими требованиями рабочего чертежа.

Несмотря на большое разнообразие конструкций режущих инструментов и специфических особенностей их применения, они имеют большое количество общих конструктивных, геометрических и других элементов, а также способов их крепления на станках.

1.1. Основные части и конструктивные элементы режущих инструментов

Любой из режущих инструментов имеет **рабочую (режущую) и крепежную части**. В основе режущей части лежит **клин**, предназначенный для снятия стружки.

Крепежная часть, оформленная в виде корпуса или хвостовика, служит для установки, базирования и закрепления инструмента на станке.

Режущий клин ограничен двумя поверхностями: **передней**, по которой сходит стружка, и **задней**, обращенной к поверхности резания, которая образуется после снятия стружки. Если эти поверхности плоские, их называют гранями. При пересечении они образуют режущую кромку (лезвие).

Различают **главную и вспомогательную режущие кромки**. Первая служит для срезания основной части припуска, а вторая – лишь частично участвует в этом процессе и служит для зачистки и окончательного формирования обработанной поверхности. У некоторых инструментов, например резбонарезных, вспомогательные режущие кромки отсутствуют. Для обеспечения работоспособности многолезвийных инструментов пространство между зубьями должно быть достаточным по объему для свободного размещения снимаемой стружки. С этой же целью на

передних поверхностях часто предусматривают углубления, уступы и другие элементы для завивания или дробления стружки. При большой ширине срезаемых слоев на режущих кромках делают канавки или выемки для деления стружки по ширине и рационального распределения нагрузки между зубьями.

У многих режущих инструментов (сверла, зенкеры, развертки, протяжки и др.) рабочая часть делится на режущую и калибрующую.

Режущая часть служит для снятия основного припуска, а **калибрующая** – для окончательного формирования обработанной поверхности и восполнения режущей части инструмента при переточках. В некоторых случаях она также служит для направления инструмента и обеспечения его самоподачи, например у резьбонарезных инструментов.

У инструментов для обработки отверстий калибрующая часть оформляется в виде ленточек, на которых расположены вспомогательные режущие кромки. При этом ленточки служат для направления и базирования инструментов в отверстия, а вспомогательные кромки – для окончательного формирования обработанной поверхности отверстий. Для предотвращения защемления инструментов в отверстиях и снижения сил трения на ленточках вследствие упругой деформации обработанных поверхностей, как правило, предусматривается небольшая **обратная конусность**, т.е. уменьшение наружного диаметра инструмента в направлении к хвостовику.

Для подвода смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в рабочей части инструментов могут быть выполнены внутренние каналы.

В зависимости от назначения инструмента и формы поверхности детали режущие кромки по форме могут быть прямолинейными, винтовыми или фасонными.

Винтовые стружечные канавки и режущие кромки, располагаемые на них, обеспечивают лучшие условия удаления стружки из зоны резания и более равномерную работу инструмента.

Работоспособность, прочность и стойкость всех режущих инструментов зависят от материала, из которого изготовлен режущий клин, физико-механических свойств обрабатываемого материала (твердость, прочность и др.) и от углов заточки режущего клина, называемых геометрическими параметрами инструмента. На оптимальное значение последних влияют **режимы резания**: скорость v , подача s и глубина t .

На рабочих чертежах инструментов не принято указывать **угол заострения** β режущего клина. Приводят только значения углов заточки: переднего γ и заднего α , имея в виду, что $\beta = 90^\circ - (\gamma + \alpha)$. Эти углы

отсчитываются от координатных плоскостей: **основной** и **плоскости резания**, задаваемых кинематикой взаимодействия инструмента и заготовки в процессе резания. Положение взаимно перпендикулярных координатных плоскостей (рис.1.1, *а*) определяется двумя линиями: режущей кромкой и векторами скорости резания (плоскость резания) и подачи (основная плоскость). **Передний угол** γ — это угол между передней плоскостью и плоскостью, перпендикулярной к плоскости резания. **Задний угол** α — это угол зазора между задней поверхностью и плоскостью резания. Если в сечении, нормальном к режущей кромке, передняя и задняя поверхности инструмента криволинейны, то их заменяют прямыми, касательными к ним (рис.1.1, *б*). Кроме обязательных углов γ и α , режущие кромки могут быть заточены также с **углами в плане** φ и φ_1 и с **углом** λ **наклона главной режущей кромки** к основной плоскости. Более подробно определение и назначение этих углов рассмотрено в гл. 2 на примере проходного токарного резца.

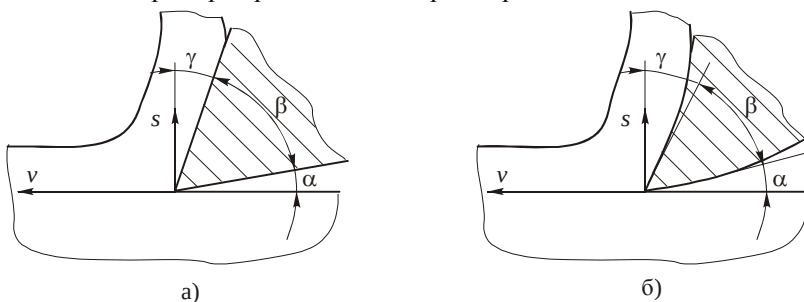


Рис. 1.1. Сечение режущего клина инструмента плоскостью, нормальной к главной режущей кромке: *а* — передняя и задняя поверхности (границы) прямолнейные; *б* — передняя и задняя поверхности криволинейные

На форму режущих кромок, а также стойкость инструмента, производительность и точность изготовления детали оказывают влияние принятый **метод формообразования поверхности детали** и принятая **схема резания**.

Окончательное формообразование поверхности детали может быть осуществлено методами: следа, копирования и обката.

При использовании **метода следа** (рис.1.2, *а*) обработанная поверхность образуется вершиной режущей кромки в соответствии с формой траектории ее движения, задаваемой станком.

Форма режущей кромки совпадает с образующей обработанной поверхности только при **методе копирования** (рис.1.2, б), реализуемом при радиальной подаче инструмента.

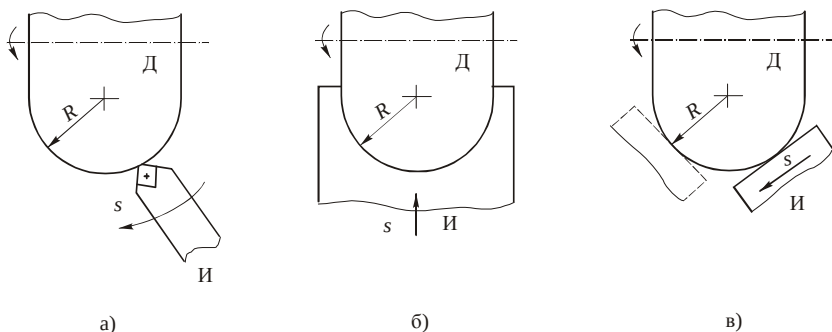


Рис.1.2. Методы формообразования инструментом (И) поверхности детали (Д) при точении: а – по следу; б – копирования; в – огибания

При **методе обката** (рис.1.2, в) обработанная поверхность является огибающей различных положений режущей кромки, которые обеспечиваются кинематикой процесса обработки, т. е. согласованными движениями инструмента и заготовки.

Под **схемой резания** понимают последовательность удаления припуска режущими кромками. В конструкциях режущих инструментов применяются следующие схемы резания: профильная, генераторная, комбинированная, одинарного и группового резания.

При **профильной схеме** режущие кромки подобны профилю обработанной поверхности, а припуск удаляется за счет превышения каждого последующего зуба над предыдущим. Таким образом, обработанная поверхность окончательно формируется последним режущим зубом, т.е. применяется **комбинированная схема**.

При **генераторной схеме** форма режущей кромки не совпадает с профилем детали, а обработанная поверхность формируется последовательно всеми зубьями инструмента. При этом качество поверхности несколько ухудшается, но удастся значительно увеличить подачу и стойкость инструмента. В этом случае для снижения шероховатости поверхности последние зубья инструмента выполняют по профильной схеме.

Эти схемы резания, а также **одинарная** и **групповая** схемы используются главным образом при протягивании и служат для перераспределения нагрузки между зубьями (см. гл. 3).

При заточке режущих клиньев на зубьях, предназначенных для чистовой, окончательной обработки, необходимо обратить внимание на остроту лезвия, которая характеризуется радиусом скругления ρ , и назначаемую толщину срезаемого слоя a_z . На инструментах из быстрорежущей стали после заточки и доводки минимальное значение радиуса $\rho = 0,005$ мм. Затупление режущего клина вызывает увеличение этого радиуса, и при $a_z \leq 0,02$ мм вместо резания происходит смятие и уплотнение срезаемого слоя (рис.1.3, а). При этом возможно появление нарыва и резкое ухудшение качества обработанной поверхности. Снятие минимальной толщины среза требует тщательной заточки и доводки рабочих поверхностей режущего клина.

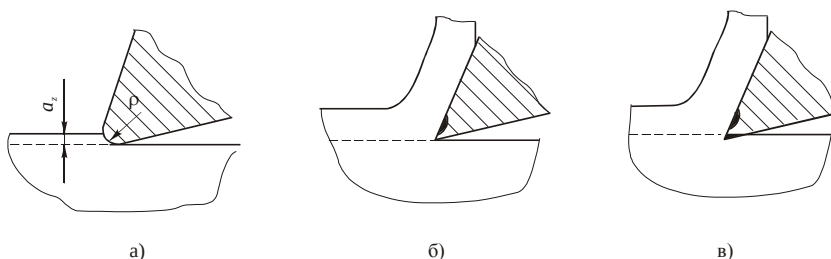


Рис.1.3. Форма режущего клина при:
а – заточке; б – износе по передней грани; в – износе по задней грани

При работе с большими подачами износ клина концентрируется на передней поверхности в форме лунки (рис.1.3, б), а при снятии тонких стружек и при обработке хрупких материалов – на задней поверхности в виде площадки износа (рис.1.3, в). Это необходимо учитывать при назначении припуска на переточку и выборе формы режущих зубьев и методов их заточки.

1.2. Способы крепления режущих инструментов на станках

По способу крепления на станках все инструменты делятся на стержневые, насадные и концевые (хвостовые). У первых крепежная часть представляет собой стержень круглого, прямоугольного или квадратного сечений, выполненный заодно с корпусом и закрепляемый в суппорте станка.

У насадных инструментов в корпусе имеются отверстия цилиндрической или конической формы (рис.1.4), с помощью которых инструменты насаживаются на оправки. Сами же инструменты – это тела вращения, на цилиндрической или конической поверхности которых находятся режущие зубья. Диаметры цилиндрических посадочных отверстий (8...100 мм) стандартизованы. Их выполняют с высокой точностью – по *H6* и *H7*, а для передачи крутящего момента делают продольную шпоночную канавку шириной $b = 2...25$ мм. Базирование инструмента осуществляется по отверстию и его торцам. Однако в связи с тем, что эта посадка подвижная и всегда имеется зазор между инструментом и оправкой, это вызывает нежелательное биение режущих кромок.

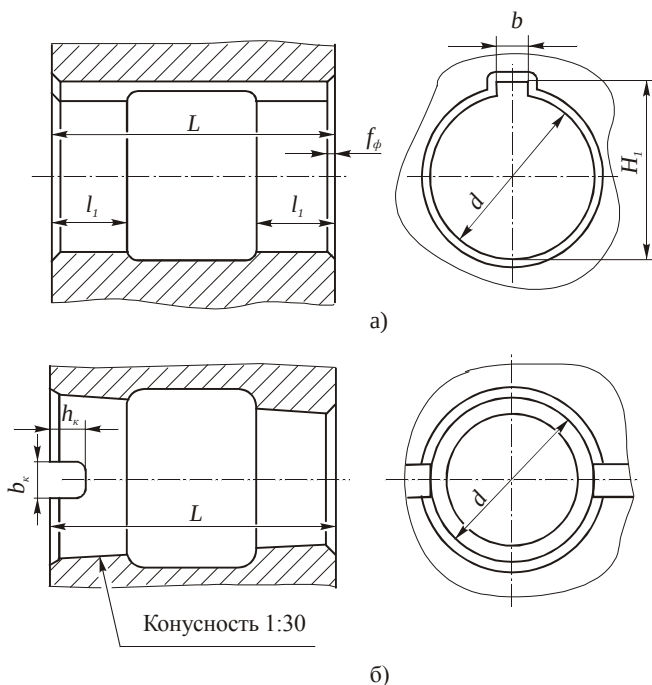


Рис.1.4. Крепежная часть насадных режущих инструментов с цилиндрическим (а) и коническим (б) отверстиями

Более точную посадку обеспечивают конические отверстия с конусностью 1:30 (рис.1.4, б), используемые, например, у разверток и зенке-

ров. При этом, чтобы не ослаблять стенки корпуса инструмента, шпоночные пазы, служащие для передачи крутящего момента, выполняют на торце корпуса.

С обоих торцов цилиндрических и конических посадочных отверстий снимают фаски $f_{\text{ф}}$, а в середине отверстий делают выточку глубиной 1 мм и длиной, равной $1/3 \dots 1/4$ длины отверстия. Выточка уменьшает длину посадочной поверхности, сокращает трудоемкость ее изготовления, а также уменьшает износ шлифовального круга. У инструментов дискового типа (фрезы, долбяки) такие выточки не делают.

Диаметры оправок для насадных инструментов определяют расчетом из условия допустимой прочности на кручение и изгиб [22, 23].

Концевые инструменты изготавливают с цилиндрическими или коническими хвостовиками, которые входят в отверстия шпинделей станков непосредственно или через переходные втулки, оправки и патроны.

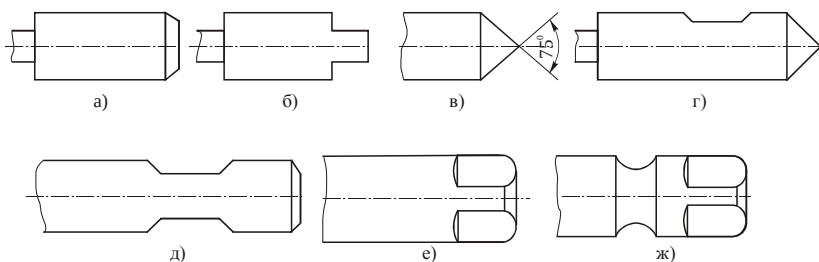


Рис. 1.5. Типы цилиндрических хвостовиков режущих инструментов

Достоинствами цилиндрических хвостовиков (рис.1.5) являются: простота при высокой точности изготовления, возможность регулирования вылета инструмента в осевом направлении. Недостаток – наличие зазора при подвижной посадке. Для передачи крутящего момента некоторые типы хвостовиков имеют поводки в виде квадратов, лысок или вырезов для крепления винтами. Гладкие цилиндрические хвостовики применяют у инструментов малых диаметров, закрепляемых в цанговых или кулачковых патронах.

Лучшее центрирование с посадкой без зазора обеспечивает крепление с помощью конических хвостовиков. Чаще всего используют самотормозящиеся хвостовики типа Морзе (№ 0...6) и метрические с конус-

ностью 1:20 (угол конуса $2\alpha = 2^\circ 50'$). Достоинством этих конусов является возможность передачи крутящих моментов без дополнительных элементов и только за счет сил трения на поверхностях контакта конуса с гнездом. При этом, например, у сверл момент трения увеличивается при возрастании осевой составляющей силы резания.

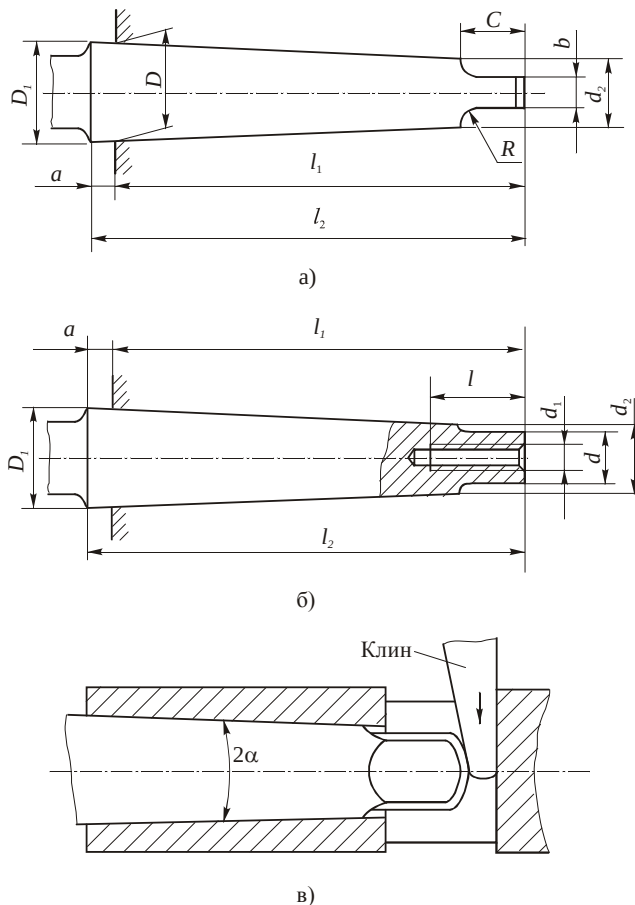


Рис.1.6. Конические хвостовики Морзе: а, б – типы; в – схема выбивания клином конического хвостовика из шпинделя станка

На рис.1.6, а, б показаны такие хвостовики с лапкой и затяжкой в гнездо болтом. При этом следует иметь в виду, что лапка не должна пе-

редавать крутящий момент. Она предназначена только для выбивания инструмента из гнезда с помощью клина (рис.1.6, в).

Для увеличения силы трения хвостовики обычно термически не обрабатывают, за исключением лапки, которую закаливают для предохранения от смятия. Чтобы не повредить клином центровое отверстие, торец лапки обрабатывают по радиусу.

Крутящий момент, передаваемый конусом, можно определить из расчетной схемы (рис.1.7). Здесь касательная составляющая силы трения на поверхности конуса

$$T = \mu N = \mu \frac{P_o}{\sin \alpha},$$

где P_o — осевая составляющая силы резания; N — нормальная составляющая силы трения; α — угол наклона образующей конуса; μ — коэффициент трения.

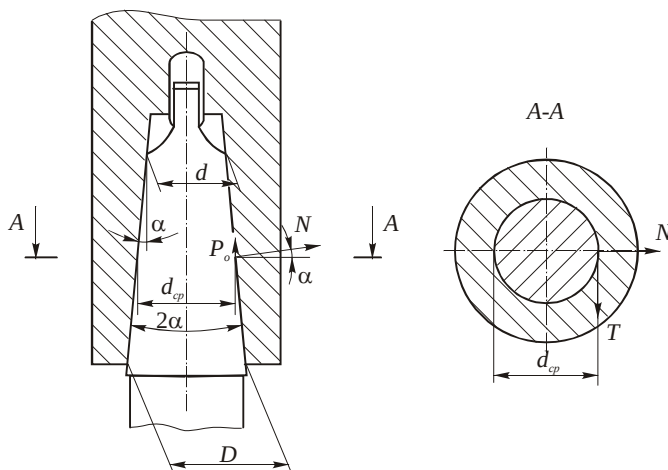


Рис.1.7. Расчетная схема для определения крутящего момента, передаваемого коническим хвостовиком ($2\alpha < 3^\circ$)

Крутящий момент от касательной составляющей силы трения на среднем диаметре $d_{cp} = \frac{D+d}{2}$:

$$M_{кр} = \frac{Td_{ср}}{2} = \frac{\mu P_0}{\sin \alpha} \cdot \frac{D+d}{4}.$$

При изготовлении конуса возможна угловая погрешность $\Delta\alpha$, которая снижает $M_{кр}$ и влияет на биение режущих кромок. С учетом этого уточненное значение $M_{кр}$ можно определить по формуле

$$M_{кр} = \frac{\mu P_0}{\sin \alpha} \cdot \frac{D+d}{4} \cdot (1 - 0,04\Delta\alpha). \quad (1.1)$$

Здесь допускаемое значение $\Delta\alpha = 10'$, а коэффициент трения $\mu = 0,096$ (сталь по стали).

Определив экспериментально отношение $M_{кр}/P_0$ для заданного значения диаметра инструмента, можно по уравнению (1.1) найти диаметры конуса D, d и подобрать по ГОСТ 25557–82 ближайший номер хвостовика.

У хвостовиков без лапок (рис.1.6, б) для создания осевого усилия и предотвращения выпадения хвостовика из гнезда на его торце делают резьбовое отверстие, в которое ввертывается болт-тяги (штрель). Такие хвостовики применяют на фрезах при малых осевых составляющих силы резания.

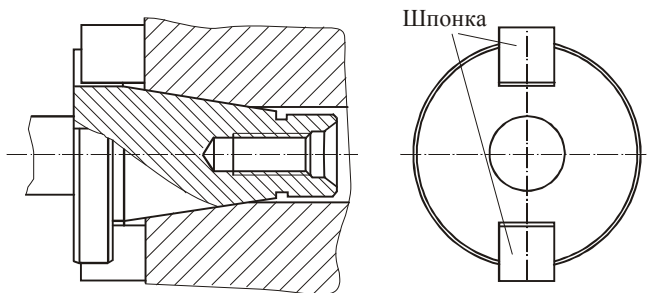


Рис. 1.8. Конический хвостовик с конусностью 7:24

Для уменьшения габаритов хвостовиков в некоторых инструментах используют укороченные хвостовики Морзе (№ 1...4) с сохранением наибольшего диаметра D и уменьшением длины конуса.

Широкое применение у быстросменных инструментов нашли также хвостовики (рис.1.8) с конусностью 7:24 ($2\alpha = 16^\circ 35'$). Они обеспечивают хорошее центрирование, но не являются самотормозящими. Поэтому для передачи крутящего момента на торце хвостовиков предусмотрены шпоночные пазы. Крепление в шпинделе осуществляется путем затяжки штревелем или специальным захватом за цилиндрическую выточку на конце хвостовика. Раньше такие конусы применялись на фрезерных станках для крепления фрез в шпинделе непосредственно или через оправку. Однако в последние годы их стали широко применять для крепления режущих и вспомогательных инструментов на станках с ЧПУ.

В настоящее время разработан ГОСТ Р 51547–2000 на полые конические хвостовики типа *HSK* (Hohlschafte Kegel), обеспечивающие надежное базирование и закрепление режущих инструментов при сверхскоростной обработке (с частотами вращения более 8000 мин^{-1}). В отличие от хвостовиков 7:24, они имеют значительно меньшие габариты, а крепление инструмента в них осуществляется по «горячей» посадке – с натягом (*H7/p6*, *H7/n6*). Действие таких патронов основано на том, что при нагреве в специальных устройствах посадочное отверстие патрона увеличивается в диаметре. Хвостовик закрепляемого инструмента вставляется в это расширенное отверстие (рис.1.9). После охлаждения патрона до комнатной температуры диаметр посадочного отверстия возвращается к исходному размеру. При этом обеспечиваются очень большие усилия зажима [2].

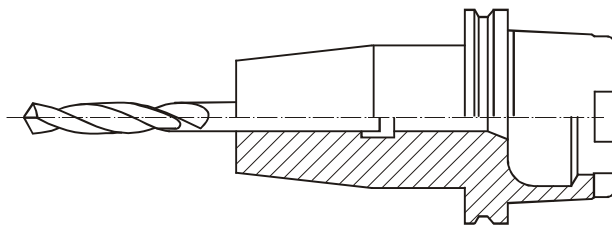


Рис.1.9. Крепление по «горячей» посадке сверла в патроне типа *HSK* для сверхскоростной обработки

У всех концевых инструментов на торцах предусматривают центровые отверстия, необходимые для их изготовления и переточки. Они, как правило, имеют предохранительные выточки или фаски, так как при повреждении конической опорной поверхности центровых отверстий

увеличивается биение режущих кромок. У инструментов малых диаметров вместо отверстий делают прямые конусы (см. рис.1.5, в, з).

1.3. Материалы, применяемые для изготовления режущих инструментов

Материалы для лезвийных инструментов. В процессе резания режущий клин инструмента на относительно небольшой площадке контакта с заготовкой испытывает воздействие высоких давлений и сил трения. Это сопровождается выделением большого количества тепла и вызывает интенсивный износ контактных поверхностей клина. Поэтому режущие материалы должны обладать высокими: 1) твердостью (не менее чем в 5 раз большей твердости обрабатываемой заготовки); 2) теплопроводностью, т.е. способностью сохранять твердость при высоких температурах резания; 3) прочностью режущего клина, особенно на изгиб; 4) износоустойчивостью при различных видах износа (абразивный, адгезионный, диффузионный и др.); 5) теплопроводностью; 6) технологичностью (пластичность, шлифуемость и др.).

Все материалы для лезвийных инструментов можно условно разбить на следующие группы: 1) инструментальные стали; 2) быстрорежущие стали; 3) твердые сплавы; 4) минералокерамические материалы; 5) сверхтвердые материалы.

Хотя составы и свойства этих материалов подробно рассматриваются в курсах материаловедения и теории резания металлов (см., например, [1]), напомним их основные особенности, направления развития и применимости для определенных видов инструментов, так как от свойств этих материалов зависят геометрические параметры инструментов и области их применения.

Инструментальные углеродистые стали – это стали с содержанием углерода свыше 0,65% и до 1,35%. Для изготовления режущих инструментов используются следующие марки углеродистых сталей: У10, У11, У12, У12А, У13. Буква У означает, что сталь углеродистая, цифрами указано содержание углерода в десятых долях процента. Если в конце обозначения добавляется буква А, то это означает, что сталь высокого качества с минимальным содержанием вредных примесей. Чем больше углерода в стали, тем выше ее твердость, достигающая после термообработки значений $HRC_{\text{с}}$ 61...65. При этом прочность стали уменьшается.

Теплостойкость углеродистых сталей невысока (200...250°C), поэтому их можно использовать только для изготовления ручных инстру-

ментов или инструментов, работающих при низких скоростях резания, а также применяемых для обработки легкообрабатываемых материалов.

Кроме высокой твердости, к числу положительных свойств углеродистых сталей можно также отнести: низкую стоимость, высокие технологичность и прочность при изгибе ($\sigma_{\text{и}}=2000\ldots 2300$ МПа). К числу недостатков, кроме низкой теплостойкости, — плохую прокаливаемость по сечению, склонность к перегреву при шлифовании и к объемным деформациям при закалке.

С целью улучшения свойств углеродистых сталей в их состав вводят в небольших количествах легирующие элементы: хром, вольфрам, марганец, кремний, ванадий и др. Это позволяет повысить их теплостойкость до $250\ldots 300$ °С, а за счет этого увеличить скорость резания в $1,2\ldots 1,4$ раза. Из этих сталей наибольшее применение в производстве режущих инструментов получили: сталь 9ХС ($C=0,9\%$, $Si=1,4\%$, $Cr=1,1\%$, $Mn=0,4\%$) и сталь ХВГ ($C=1,0\%$, $Mn=0,95\%$, $Cr=1,1\%$, $W=1,4\%$). Последняя марка стали, дающая малые объемные деформации при закалке, применяется главным образом для изготовления протяжек и других инструментов с малой поперечной жесткостью (длинные развертки, метчики и др.).

Для изготовления резьбонакатных инструментов (плашки, ролики) применяется сталь Х6ВФ ($C=1,6\%$, $Cr=6,0\%$, $W=1,3\%$, $V=0,7\%$), обладающая наибольшей износостойкостью.

Быстрорежущие стали были изобретены в начале XX столетия и произвели первый переворот в развитии машиностроения. Благодаря высокой теплостойкости ($600\ldots 650$ °С) они позволили увеличить скорости резания в $3\ldots 5$ раз. В быстрорежущих сталях при том же количестве углерода, что и в инструментальных сталях, повышение теплостойкости было достигнуто за счет введения в их состав в больших количествах вольфрама, молибдена, хрома и ванадия, образующих тепло- и износостойкие карбиды.

Одним из важных свойств быстрорежущих сталей при их высокой твердости после термообработки ($HRC_{\text{э}} 62\ldots 65$) является высокая прочность при изгибе ($\sigma_{\text{и}}=2900\ldots 3100$ МПа), наибольшая из всех известных инструментальных материалов. Благодаря этим свойствам, а также хорошей технологичности быстрорежущие стали в настоящее время остаются основными материалами для изготовления режущих инструментов и особенно сложнопрофильных, имеющих фасонные режущие кромки.

Первой из большого числа марок быстрорежущих сталей была разработана сталь P18, содержащая 18% вольфрама. Ее недостатками являются высокая стоимость из-за большого содержания дефицитного вольфрама, пониженные пластичность и прочность. Поэтому после Второй мировой войны были предприняты попытки замены вольфрама молибденом. При этом было установлено, что введение 1% молибдена эквивалентно введению примерно 1,5...2% вольфрама. Благодаря этому удалось повысить пластичность и прочность быстрорежущей стали. Поэтому в настоящее время в мировой практике наибольшее применение нашла быстрорежущая сталь марки P6M5 (W=6%, Mo=5%, Cr=4%, V=2%). Она составляет около 70% от общего выпуска быстрорежущих сталей и относится к **сталям нормальной производительности**.

ГОСТ 5950–73 содержит 8 марок быстрорежущих сталей различных составов. В их числе находятся **стали повышенной производительности**, дополнительно легированные кобальтом (до 10%) и с повышенным содержанием ванадия (до 5%). Они имеют повышенные теплостойкость (до 650...700 °С) и твердость (до HRC_{Σ} 64...67), но пониженные прочность и технологичность. Стоимость их существенно выше стоимости стали P6M5. Применяют эти стали главным образом для изготовления инструментов, предназначенных для обработки жаропрочных и нержавеющих сталей, титановых сплавов, а также для изготовления наиболее сложных и дорогих инструментов, таких как протяжки и зуборезные инструменты. Из получивших наибольшее применение марок сталей повышенной производительности можно отметить экономно легированные стали P6M5K5, P9M4K8, P12Ф4.

Дальнейшее повышение режущих свойств быстрорежущих сталей возможно путем: 1) выплавки сталей в вакуумно-дуговых печах с использованием метода электрошлакового переплава и др.; 2) использования методов порошковой металлургии с целью получения сталей мелкозернистой структуры повышенной прочности и высокой степени легированности; 3) применения термомеханической и химико-термической обработки, а также поверхностного пластического упрочнения; 4) нанесения износостойких покрытий из карбидов и нитридов титана, ниобия и других элементов.

Твердые сплавы, или так называемые металлокерамические сплавы, — это материалы, состоящие из карбидов вольфрама (однокарбидные), вольфрама и титана (двухкарбидные) и с добавлением тантала, ниобия и др. (трехкарбидные), связанных между собой связкой — кобальтом. Металлокерамическими их называют по способу изготовления из мелкодисперсных порошков прессованием с последующим спекани-

ем при температуре 1000...2000 °С, традиционному при производстве керамики.

С появлением в 30-х годах XX столетия твердых сплавов произошел второй скачок роста скоростей резания (в 4...5 раз). Этот переворот в металлообработке и станкостроении стал возможен благодаря значительному повышению теплостойкости (до 800...900 °С) и износостойкости этих материалов по сравнению с быстрорежущими сталями. Однако внедрение этих сплавов сопровождалось большими трудностями, так как их прочность оказалась значительно ниже, чем у быстрорежущих сталей. Потребовалось создание новых скоростных и мощных станков с высокими жесткостью и виброустойчивостью.

Предел прочности при сжатии у твердых сплавов примерно того же уровня, что и у быстрорежущей стали, а предел прочности при изгибе меньше в 1,5...2 раза. Причем двухкарбидные сплавы из-за высокой хрупкости карбидов титана имеют более низкую прочность, чем однокарбидные. Твердые сплавы имеют твердость, равную *HRA* 88...96, что на 11...12% выше твердости быстрорежущей стали.

В ГОСТ 3882–74 содержится 7 марок однокарбидных, 5 марок двухкарбидных и 4 марки трехкарбидных твердых сплавов, которые отличаются по своему составу, физико-механическим свойствам и назначению.

Наиболее применяемые **однокарбидные** сплавы марок ВК4, ВК6, ВК8, ВК10 (по применяемости группа *K*) рекомендуются для обработки главным образом хрупких материалов, образующих элементную стружку, например чугунов, медных сплавов, алюминиевых сплавов с высокими абразивными свойствами и т.п. С увеличением процентного содержания кобальта как связки (последняя цифра в обозначении) прочность таких сплавов повышается, но одновременно снижается их износостойкость. Поэтому первые три марки рекомендуются для чистовой и получистовой обработки, а последние – для черновой обработки, работе по корке, с ударной нагрузкой и т.п.

У **двухкарбидных** сплавов марок Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10 (группа *P*) первая цифра означает процентное содержание карбидов титана, вторая – кобальта, остальное – карбидов вольфрама. Эти сплавы рекомендуются для скоростной обработки углеродистых сталей, так как введение карбида титана позволило значительно повысить сопротивление адгезионному износу, имеющему место при образовании сливной стружки.

Трехкарбидные сплавы (группа *M*), 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 титановых сплавов.

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

Разработано несколько марок мелко- и особо мелкозернистых сплавов с размером зерен карбидов 1 мкм и менее. Для обозначения структуры в конце маркировки таких сплавов ставятся буквы М или ОМ, например ВК6М, ВК10-ОМ и др. Эти сплавы дают хорошие результаты при точении жаропрочных и нержавеющей сталей, чугунов высокой прочности и алюминиевых сплавов. Благодаря уменьшению размеров зерен карбидов вольфрама и дополнительному введению карбидов хрома у сплава марки ВК10-ХОМ удалось, например, обеспечить хорошую износостойчивость режущих кромок при высоких скоростях резания. Поэтому такой сплав можно успешно применять как при чистовой, так и при черновой обработке.

Благодаря мелкозернистой* и плотной структуре твердых сплавов можно проводить заточку и доводку инструментов с наименьшим радиусом скругления режущего клина, приближающимся к достигнутому у инструментов из быстрорежущей стали. Это позволяет получить более низкую шероховатость обработанной поверхности и более высокую размерную стойкость.

Крупнозернистые сплавы с размером зерна карбидов вольфрама 3...5 мкм, например твердые сплавы марок ВК4В, ВК8В, имеют большую прочность, чем обычные сплавы, и рекомендуются для черновой обработки и для резания с ударами.

В результате совершенствования технологии получения твердых сплавов была разработана группа сплавов с добавкой тантала, обозначаемых буквами МС (Москва – Сандвик) и несколькими цифровыми

* В настоящее время за рубежом освоен выпуск твердых сплавов с ультрамелкодисперсной структурой

значениями, которые показали повышение стойкости примерно в 1,5 раза, высокую надежность и стабильность режущих свойств.

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.

Эффективным путем повышения эксплуатационных характеристик твердых сплавов является нанесение на твердосплавные сменные многогранные пластины (СМП) тонких износостойких покрытий на основе карбидов и нитридов титана, молибдена, ниобия, гафния и других элементов, а также окиси алюминия. Толщина одно- и многослойных покрытий (четыре и более слоев) колеблется в пределах от 5 мкм до 0,2 мм. Практика применения таких покрытий показала, что они обеспечивают значительный рост износостойкости инструмента при одновременном повышении прочности за счет использования в качестве основы более прочных марок твердых сплавов.

Режущая минералокерамика впервые была создана в 50-е годы XX столетия. Отечественная керамика марки ЦМ-332 была изготовлена на основе глинозема (Al_2O_3) с добавкой оксида магния (0,5...1,0%) в качестве связующего средства. При этом удалось не только исключить использование дефицитных металлов, но и получить режущий материал с теплостойкостью 1200 °С, большей, чем у твердых сплавов. К сожалению, ее прочность при изгибе оказалась низкой ($\sigma_{\text{и}}=350\ldots400$ МПа), поэтому из-за большой хрупкости и нестабильности свойств это приводило при работе к выкрашиванию и поломке пластин.

В результате интенсивных исследований, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, были разработаны новые марки минералокерамики – керметы, в состав которых с целью повышения прочности вводили добавки карбидов, нитридов, оксидов вольфрама, титана, молибдена и циркония. Менялась технология получения керамики, например, использовалось горячее прессование, уменьшалась зернистость до 2 мкм и др. Благодаря этому, например, у отечественной керамики марки ВШ75 удалось повысить прочность при изгибе до $\sigma_{\text{и}}=500\ldots600$ МПа, а у оксидно-карбидной керамики марок ВЗ, ВОК-

60, ВОК-63 – до $\sigma_{\text{и}}=600...700$ МПа. Вследствие этого стало возможным использовать эти, по сути композиционные, материалы не только при чистовом точении закаленных сталей и высокопрочных чугунов, но и при ударных нагрузках, например при фрезеровании.

К числу новых, более эффективных марок режущей керамики относятся оксидно-нитридная керамика на основе нитрида титана (ОНТ-20) и нитридная керамика на основе нитрида кремния (силинит-Р). По сравнению с керамикой ВОК-63 они позволили добиться повышения стойкости в 6...8 раз при прерывистом точении чугуна на режимах: $v=300...400$ м/мин, $s=0,3$ мм/об, $t=1$ мм.

Наибольшая эффективность режущей керамики при ее стоимости, меньшей, чем стоимость твердых сплавов, достигается при точении на высокоскоростных и мощных станках, имеющих высокую жесткость, точность и виброустойчивость.

Сверхтвердые материалы (СТМ) – к ним относят алмазы (природные и синтетические) и композиционные материалы на основе кубического нитрида бора.

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 спайности. 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. Теплоустойчивость 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. Каждый атом бора соединен с четырьмя атомами азота. По твердости КНБ несколько уступает алмазу, но имеет высокую теплоустойчивость, доходящую до 1300...1500 °С, и практически инертен к уг-

лероду 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 ($\sigma_{\text{и}}=1000\dots1500$ МПа), поэтому его используют при ударных нагрузках. Остальные композиты применяются при безударной чистовой обработке закаленных сталей, высокопрочных чугунов и некоторых труднообрабатываемых сплавов.

Во многих случаях точение композитами эффективнее процесса шлифования, так как из-за своей высокой теплопроводности КНБ не дает прижогов при работе на высоких скоростях резания и обеспечивает при этом низкую шероховатость поверхности.

Используют композиты в виде мелкоразмерных пластин квадратной, треугольной и круглой форм, закрепляемых на корпусе инструмента пайкой или механическим способом.

В последнее время применяют также пластины из твердого сплава с нанесенным на них слоем композита или поликристаллов алмаза. Такие двухслойные пластины обладают большей прочностью, износостойкостью и более удобны для крепления. Они позволяют снимать припуски большой глубины.

Для удобства сопоставления по двум важнейшим свойствам все рассмотренные группы инструментальных материалов сведены в табл.1.1, а на рис.1.10 ориентировочно показаны области их применения по скорости резания и подаче.

Т а б л и ц а 1.1

Некоторые свойства инструментальных материалов

Инструментальный материал	Теплостойкость, °С	Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{и}}$, МПа
Углеродистые стали	200...250	1900...2000
Низколегированные инструментальные стали	250...300	2000...2500
Быстрорежущие стали	600...650	2050...3400
Твердые сплавы	800...900	900...2000
Минералокерамика	1100...1200	325...700
Алмазы	700...800	210...400
Композиты КНБ	1300...1500	400...1500

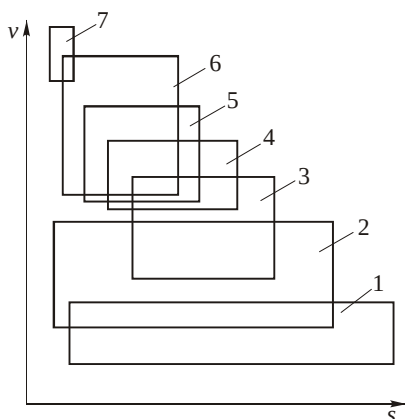


Рис. 1.10. Области применения режущих материалов по скорости резания v и подаче s :
 1 – быстрорежущие стали; 2 – твердые сплавы; 3 – твердые сплавы с покрытиями;
 4 – нитридная керамика; 5 – черная керамика (керметы); 6 – оксидная (белая) керамика;
 7 – кубический нитрид бора

Следует отметить, что по применяемости в режущих лезвийных инструментах инструментальные материалы располагаются примерно следующим образом: 60...70% материалов приходится на быстрорежущие стали, 20...30% – на твердые сплавы, 5...10% – на остальные материалы. Высокий процент применяемости быстрорежущих сталей объясняется главным образом их прочностными и технологическими свойствами, обеспечивающими высокую надежность и универсальность инструментов. Вторыми по применяемости являются твердые сплавы, на долю которых благодаря их высоким режущим свойствам приходится более половины объема снимаемой

стружки.

Материалы для абразивных инструментов. В последнее время абразивные инструменты находят все более широкое применение в обработке резанием благодаря обеспечению высокой производительности, точности и минимальной шероховатости не только на чистовых операциях, но и при формообразовании фасонных профилей методом глубинного шлифования (см. гл.13). Только абразивными инструментами оказывается экономически целесообразной обработка современных труднообрабатываемых, сверхтвердых материалов и твердых сплавов. О широком применении абразивных инструментов говорит тот факт, что парк станков для абразивной обработки достигает 20% от общего их числа, а в подшипниковой и некоторых других отраслях промышленности этот показатель достигает 60% и более.

Абразивные инструменты в своей основе содержат абразивные материалы, которые выпускаются в виде зерен и порошков и характеризуются высокими твердостью, прочностью, тепло- и износостойкостью.

По своему происхождению абразивные материалы делятся на естественные и искусственные. Последние, благодаря большей однородности и низкому содержанию примесей, получили наибольшее применение в производстве абразивных инструментов.

К искусственным абразивным материалам относятся: электрокорунды, карбиды кремния, карбиды бора, алмазы, КНБ (эльбор).

Электрокорунды получают плавкой в электрических печах боксита или глинозема, содержащих окись алюминия. В зависимости от процентного содержания корунда электрокорунды бывают следующих разновидностей:

- нормальный электрокорунд марок 13А...16А содержит 93...96,5% корунда, характеризуется высокими прочностью и вязкостью, что позволяет использовать его как на чистовых, так и на обдирочных операциях при обработке различных металлов;
- белый электрокорунд марок 22А...25А содержит 96...99% корунда и применяется для изготовления всех видов абразивных инструментов, а также микропорошков, используемых для обработки свободным абразивом;
- хромистый электрокорунд марок 33А, 34А, титанистый электрокорунд марки 37А, хромотитанистый электрокорунд марок 91А...94А содержат 95...98% корунда с добавлением хрома и титана, что улучшает их абразивные свойства. Легированные электрокорунды применяются для изготовления всех видов абразивных инструментов и, по сравнению с обычными электрокорундами, обеспечивают значительное повышение производительности при обработке конструкционных и углеродистых сталей;
- циркониевый электрокорунд марки 38А состоит из корунда (75...80%) и окиси циркония и используется для изготовления обдирочных кругов. По сравнению с кругами из электрокорунда круги из циркониевого электрокорунда работают на повышенных режимах резания, а их стойкость на обдирочных операциях увеличивается до 40 раз.

Монокорунд марок 43А...45А содержит 98% корунда, обладает высокими механическими и режущими свойствами и применяется для изготовления всех видов абразивных инструментов, используемых для обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Карбид кремния получают плавкой в электропечах кремнезема и материалов с высоким содержанием углерода (кокс, антрацит и т.п.). В зависимости от процентного содержания чистого карбида и цвета различают карбид кремния зеленый ($\text{SiC} \leq 97\%$) и карбид кремния черный ($\text{SiC} \leq 95\%$):

- карбид кремния зеленый марок 62С...64С обладает большими твердостью и абразивной способностью, но меньшей вязкостью. Изготавливается в виде кругов, брусков, абразивной шкурки, паст и применяется для обработки твердых сплавов (пластмассы, камень, мрамор и др.);

- карбид кремния черный марок 52С...54С отличается большей хрупкостью и применяется для обработки заготовок из чугуна, цветных металлов, неметаллических хрупких материалов.

Карбид бора марки КБ получают плавкой шихты из технической борной кислоты B_2O_3 и нефтяного кокса. Карбид бора содержит 84...93% кристаллического карбида бора B_4C , имеет малую зернистость, очень высокую твердость и хрупкость, и поэтому его выпускают в виде порошков и паст и используют для обработки (доводки) незакрепленным зерном деталей из твердого сплава и чугунов.

Алмаз синтетический выпускают в виде зерен размерами 0,1...3000 мкм и применяют для изготовления кругов, паст, брусков, а также карандашей и роликов для правки шлифовальных кругов. При обработке твердых сплавов шлифованием, резке и доводке используют кристаллические синтетические алмазы марок АС2...АС6, АС15, АС20, АС32, АС50 или поликристаллические марок АРК4, АРС3 с покрытием зерен карбидом вольфрама (К) и кремнием (С), повышающих их производительность и прочность. Микропорошки марок АСМ и АСН нормальной и повышенной режущей способности применяют для изготовления всех видов абразивных инструментов, а также в виде паст для доводки и притирки.

Кубический нитрид бора (эльбор) применяют для обработки изделий из легированных и закаленных сталей. В зависимости от вида сырья для синтеза, способа получения, прочности и наличия покрытий эльбор производится следующих марок: ЛО, ЛП и ЛКВ – соответственно, обычной, повышенной и высокой механической прочности; ЛД – поликристаллический; ЛОМ и ЛОС – с покрытием пленками, содержащими кремний или углерод. Из эльбора изготавливают все виды инструментов.

1.4. Основные направления совершенствования режущих инструментов

С момента появления машинного производства работы по совершенствованию режущих инструментов во всем мире ведутся во все возрастающих объемах. Об этом говорят тысячи патентов на новые конструкции инструментов, новые экспонаты на ежегодных международных

и национальных выставках. В этой области постоянно работают коллективы научно-исследовательских институтов и лабораторий, конструкторских бюро многочисленных фирм и производственных предприятий.

Работы по совершенствованию режущих инструментов тесно взаимосвязаны с развитием станкостроения, которое ставит задачи по созданию новых конструкций режущих инструментов. В свою очередь, появление новых режущих материалов и новых типов режущих инструментов приводит к постоянному совершенствованию и обновлению станочного парка.

Основными целями этих работ являются: повышение производительности обработки; обеспечение все возрастающих требований к точности и качеству поверхностей изготавливаемых деталей; повышение экономической эффективности применения новых режущих инструментов.

На рис.1.11 схематично показаны основные направления работ по достижению этих целей. Так, для достижения высокой производительности главенствующая роль отводится созданию новых и совершенствованию применяемых режущих материалов. В частности, в настоящее время весьма перспективным направлением лезвийной обработки является так называемая «твердая обработка» металлов твердостью $HRC_{\geq 47}$, которая применяется с целью замены шлифования лезвийной обработкой. Суть ее состоит в том, что благодаря специально подобранной геометрии инструмента, оснащенного керамикой или КНБ, и режиму резания обрабатываемый металл в процессе резания нагревается, а его твердость вследствие отпуска снижается до твердости 25 $HRC_{\geq}$. После отделения стружки материал заготовки быстро охлаждается, а его твердость снижается не более, чем на 2 $HRC_{\geq}$. «Твердое точение» экономичнее шлифования, а по точности не уступает ему.

С этим направлением тесно связаны работы по оптимизации геометрических параметров инструментов, обеспечивающие получение максимально возможной экономической стойкости. Для автоматизированного производства (станки с ЧПУ, автоматические линии и др.) большое значение приобретает размерная стойкость, которая определяет время работы инструмента без потери точности размера деталей. Она зависит от свойств режущего материала, геометрии режущей части и правильного выбора режима резания.

При резании пластичных материалов на высоких скоростях большое внимание уделяется вопросам получения транспортабельной формы стружки. Чаще всего эта задача решается путем правильного выбора геометрии передней поверхности инструмента.

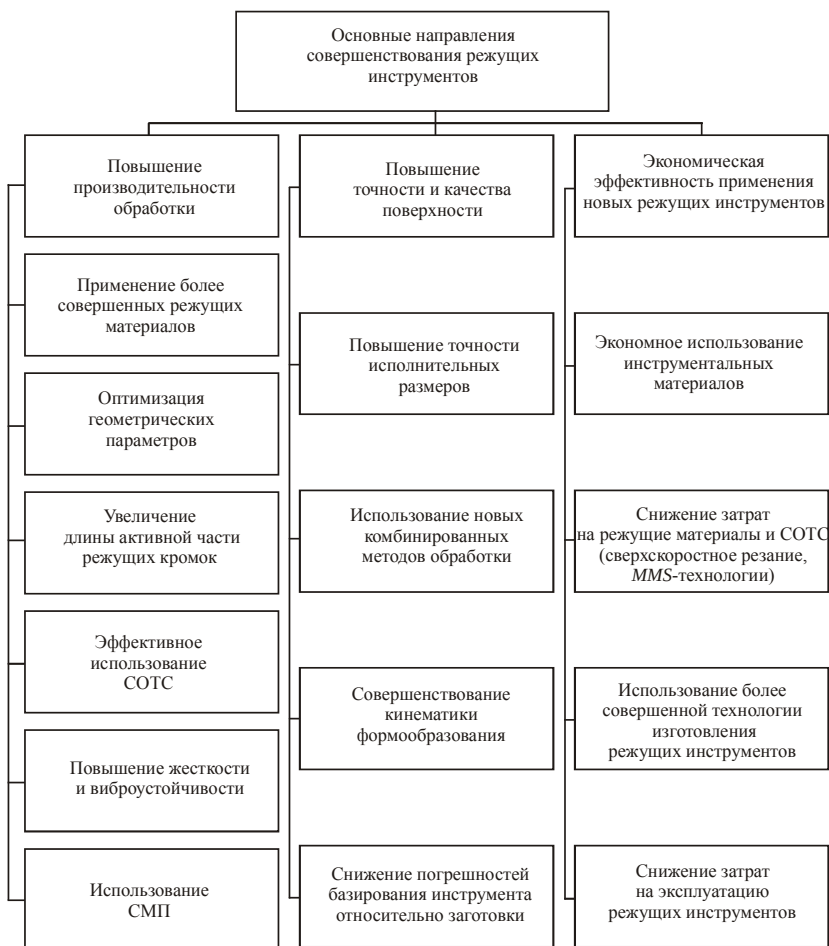


Рис.1.11. Пути совершенствования режущих инструментов

Существенный рост производительности обеспечивает увеличение длины активной части режущих кромок, т.е. режущих кромок, одновременно снимающих стружку. Этот экстенсивный путь, не требующий больших капитальных затрат, дает значительную экономию вспомогательного времени за счет совмещения операций.

К числу весьма производительных инструментов, разработанных по этому направлению, относятся: многолезвийные инструменты, напри-

мер протяжки, комбинированные инструменты, многолезцовые инструментальные головки и др.

Повышению стойкости режущих инструментов способствует эффективное использование различных СОТС. Они обеспечивают снижение температуры резания, повышение качества обработанной поверхности и получение транспортабельной формы стружки. В качестве СОТС используются обычно различные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), аэрозоли, сжатый воздух и др. Как показали эксперименты, эффективность снижения температуры резания возрастает с увеличением скорости протекания через зону резания СОТС, подаваемой в виде жидкостей, а также в виде аэрозолей (охлаждение «туманом»).

Повышение жесткости и виброустойчивости режущих инструментов позволяет повысить их стойкость, увеличить подачу, а следовательно, производительность процесса резания. У осевых инструментов это достигается за счет увеличения площади поперечного сечения корпусов инструментов и максимально возможного сокращения длины рабочей части, при обработке глубоких отверстий – за счет применения дополнительных опор в виде направляющих, стеблевых люнетов, виброгасителей и других устройств.

При проектировании многолезвийных инструментов большое значение приобретает вопрос рационального распределения нагрузки между зубьями, т.е. разработка оптимальной схемы резания. За счет применения прогрессивной групповой схемы резания удалось, например, значительно сократить длину протяжки при увеличении подачи на зуб. Аналогичные решения применимы и на других видах инструментов (фрезы, расточные головки и т.п.).

Использование прогрессивных режущих материалов (твердые сплавы, керамика, СМТ) в виде СМП позволило повысить надежность работы режущих инструментов, интенсифицировать режимы резания, обеспечить быстросменность инструментов при их износе, что особенно важно для автоматизированного производства. Это направление позволило создать широкую номенклатуру резцов, фрез и других видов инструментов новейших конструкций, выпускаемых многими ведущими фирмами мира.

С ростом технического прогресса современные машины становятся все более мощными и скоростными. Для повышения надежности и долговечности машин, обеспечения работы без вибраций и динамических перегрузок высокие требования предъявляются к точности размеров, формы и качеству поверхностей их деталей. В этой связи в первую очередь ужесточают требования к точности режущих инструментов. На-

пример, допуск на диаметр мерного инструмента (зенкеры, развертки и т.п.) должен быть в 2...3 раза меньше допуска на диаметр обработанного отверстия. Инструменты для автоматизированного производства характеризуются еще более узкими допусками на исполнительные размеры, биение режущих кромок, качество поверхностей зубьев и стружечных канавок.

Высокой точности и качества поверхности деталей удастся добиться при использовании комбинированных методов обработки, а именно при дополнении, например, метода резания методом холодного пластического деформирования микронеровностей. Эффективность этого направления будет показана ниже на примере протяжек, инструментов одностороннего резания и др.

Совершенствование кинематики взаимодействия инструмента и заготовки привело к разработке новых методов формирования поверхностей изготавливаемых деталей, повышению точности их размеров и взаимного расположения поверхностей. Например, за счет применения методов обкаточного огибания и копирования фасонными инструментами, применения комбинированных инструментов и т.д. При этом одновременно повышается и производительность обработки.

За счет оснащения инструментов на чистовых операциях новейшими режущими материалами: керамикой, СТМ – удалось не только повысить режимы резания, но и добиться высокого качества обрабатываемых поверхностей, заменив во многих случаях процесс шлифования тонким точением и растачиванием.

Конечной целью совершенствования режущих инструментов является сокращение затрат на изготовление деталей машин, снижение их себестоимости за счет внедрения прогрессивных видов инструментов. При этом следует иметь в виду, что эффективность принимаемых решений обеспечивается не только конструкцией инструментов, но и технологичностью их изготовления, а также затратами на эксплуатацию.

Окупаемость инструментов, особенно специальных, зависит от типа производства. Поэтому одним из первых направлений совершенствования режущих инструментов является экономия на использовании дорогих инструментальных материалов. Учитывая, что в процессе резания принимают участие только режущие клинья, весьма небольшие по объему, и на себестоимость деталей переходит только стоимость ничтожно малой изношенной части клина, необходимо сокращать до рационального минимума применение этих материалов. С этой целью рекомендуется использовать преимущественно составной инструмент с режущим материалом в виде пластин, закрепляемых на корпусе методами пайки, сварки, склеи-

вания или механическим путем. Экономически выгодно изготавливать цельным только мелкогазмерный инструмент, крупногазмерный необходимо снабжать вставными ножами из конструкционных сталей и оснащать их пластинами из инструментальных материалов.

С целью экономии затрат на режущий инструмент и СОТС в последние годы ведутся работы по внедрению сверхгазроскоростного резания и обработке с минимальными затратами на СОТС. Эксперименты показали, что при сверхвысоких скоростях интенсивность износа снижается по сравнению с обычным резанием. Уже сегодня в ведущих странах мира используется высоко- и сверхгазроскоростная обработка на скоростях резания 500...1500 м/мин и более [1, 2], что оказывается возможным лишь при условии создания новых видов инструментальных материалов и более совершенных станков.

Из-за высоких затрат на смазочно-охлаждающие средства (до 16% в себестоимости обработки деталей) в настоящее время большое внимание уделяется так называемой «сухой обработке» резанием, т.е. без применения СОТС. В тех случаях, когда полный отказ от них невозможен, например при сверлении, рекомендуется обработка с применением минимального количества СОЖ, так называемая *MMS*-технология (*Minimalmengenschmierung*), которая заключается в охлаждении зоны резания небольшим количеством СОЖ, подаваемой под давлением до 0,6 МПа с помощью потока воздуха. Расход СОЖ, превращаемой в этом случае в аэрозоль, обычно не превышает 80 мл/ч. При этом исключаются затраты на подготовку и утилизацию СОЖ, очистку стружки и т.д. [15]. Так, например, по данным фирмы «Gühring» (Германия), при глубоко сверлении алюминиевого сплава ружейными сверлами отверстий диаметром 10 мм и глубиной 200 мм при таком способе подачи масляной СОЖ (через внутренние отверстия в сверле) удалось повысить стойкость инструмента в 4 раза, подачу – в 3 раза, а скорость резания увеличить с 130 до 160 м/мин.

На стоимость режущих инструментов большое влияние оказывает технология их изготовления. Большой экономический эффект дает, например, применение способов горячего пластического деформирования (прокатка, прессование) для изготовления концевых инструментов (сверл, фрез и т.п.). Это достигается за счет увеличения производительности процесса изготовления инструментов и экономии быстрорежущей стали.

При изготовлении быстрорежущих мелкогазмерных концевых инструментов в последнее время широко используется метод скоростного шлифования профиля эльборовыми кругами на станках с ЧПУ,

который позволяет значительно повысить точность и качество поверхности инструментов при одновременном сокращении затрат на их изготовление.

На эффективность применения режущих инструментов большое влияние оказывают расходы на эксплуатацию, главным образом на переточку и восстановление режущих свойств. Их снижение возможно при автоматизации операций заточки либо при полном отказе от нее, например в случае применения СМП или мелкогабаритных инструментов диаметром менее 5 мм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные части режущих инструментов, их назначение и конструктивные особенности.
2. Способы крепления насадных и концевых инструментов на станке.
3. Как рассчитать номер конуса у инструментов с коническим хвостовиком?
4. Назовите основные группы режущих материалов, применяемых для изготовления лезвийных инструментов. Их основные свойства и области применения.
5. В каких направлениях совершенствуются режущие инструменты? Приведите примеры прогрессивных конструкций инструментов, обеспечивающих повышение производительности, точности обработки и экономичности.

2. РЕЗЦЫ

Резцы являются одними из самых распространенных режущих инструментов. Они применяются при работе на токарных, расточных, строгальных, долбежных и других типах станков при обработке наружных и внутренних поверхностей самых разнообразных форм. Резцы можно классифицировать, например, по следующим основным признакам:

- 1) тип станка – токарные, расточные, строгальные и др.;
- 2) вид операции – проходные, подрезные, отрезные, фасонные, резьбонарезные и др.;
- 3) направление подачи – радиальные, тангенциальные;
- 4) конструкция – цельные, сборные: сварные, с напайкой или механическим закреплением режущих пластин;
- 5) материал режущей части – быстрорежущие, твердосплавные, с пластинами из керамики или сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и др.).

2.1. Конструктивные элементы и геометрические параметры проходных токарных резцов

Из всех видов токарных резцов наиболее распространенными являются проходные резцы. Они предназначены для точения наружных поверхностей, подрезки торцов, уступов и т.д.

Призматическое тело проходного резца (рис. 2.1), как и любого другого, состоит из режущей части (головки) и державки. Головка резца содержит переднюю 1, главную заднюю 2 и вспомогательную заднюю 3 поверхности. Пересечения этих поверхностей образуют главную 4 и вспомогательную 5 режущие кромки.

По передней поверхности сходит снимаемая резцом стружка. Главная задняя поверхность обращена к поверхности резания, образуемой

главной режущей кромкой, а вспомогательная задняя поверхность – к обработанной поверхности детали.

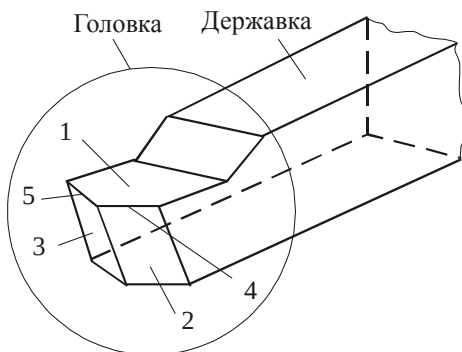


Рис.2.1. Конструктивные элементы токарного резца: 1 – передняя поверхность; 2 – главная задняя поверхность; 3 – вспомогательная задняя поверхность; 4 – главная режущая кромка; 5 – вспомогательная режущая кромка

Указанные поверхности и режущие кромки после заточки располагаются под определенными углами относительно двух координатных плоскостей и направления подачи, выбираемыми с учетом кинематики станка.

За координатные плоскости (рис.2.2) принимают две взаимно перпендикулярные плоскости: 1) **плоскость резания**, проходящую через главную режущую кромку, и вектор скорости резания, касательный к поверхности резания, и 2) **основную плоскость**, проходящую че-

рез эту же кромку и нормаль к вектору скорости резания.

Есть другое определение основной плоскости: это плоскость, проходящая через векторы продольной $s_{пр}$ и радиальной s_r подачи. В частном случае она может совпадать с основанием резца. В этом случае возможно измерение углов резца вне станка в его статическом положении.

За вектор скорости резания, применительно к резцам, а также ко многим другим инструментам, принимают вектор окружной скорости детали без учета вектора продольной подачи, который во много раз меньше вектора окружной скорости и не оказывает заметного влияния на величину передних и задних углов. Только в отдельных случаях, применительно, например, к сверлам, в точках режущих кромок, прилегающих к оси сверла, это влияние становится существенным.

На рис. 2.2 представлены вид заготовки и резца в плане и геометрические параметры, обязательно указываемые на рабочих чертежах резцов: γ , α , α_1 , λ , ϕ , ϕ_1 . Ниже даны определения и рекомендации по назначению их величин.

Передний и задний углы главной режущей кромки принято измерять в главной секущей плоскости $N-N$, проходящей нормально к проекции этой кромки на основную плоскость, которая в данном случае

совпадает с плоскостью чертежа. Плоскость $N-N$ выбрана в связи с тем, что именно в ней происходит деформация металла при резании.

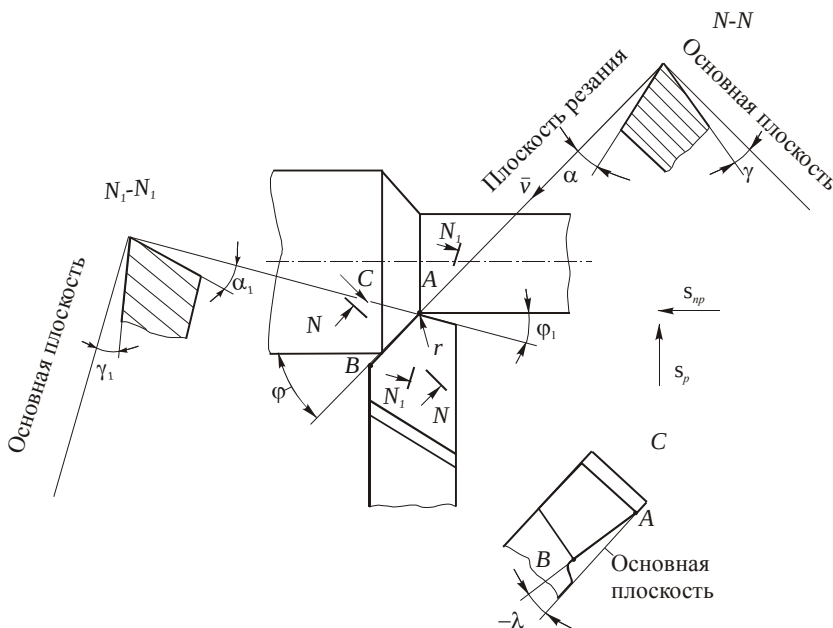


Рис.2.2. Геометрические параметры проходного токарного реза

Передний угол γ – это угол между основной плоскостью и плоскостью, касательной к передней поверхности. Величина этого угла оказывает на процесс резания определяющее влияние, так как от него зависят степень деформации металла при переходе в стружку, силовая и тепловая нагрузки на режущий клин, прочность клина и условия отвода тепла из зоны резания. Оптимальное значение переднего угла γ определяется опытным путем в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого и режущего материалов, факторов режима резания (v , s , t) и других условий обработки. Возможные значения угла γ находятся в пределах $0...30^\circ$. Для упрочнения режущего клина, особенно изготовленного из хрупких режущих материалов, на передней поверхности затачивают фаску с нулевым или отрицательным передним углом ($\gamma_\phi = 0...-5^\circ$), шириной f , зависящей от подачи.

Задний угол α – это угол между плоскостью резания и плоскостью, касательной к задней поверхности. Фактически это угол зазора, препятствующего трению задней поверхности резца о поверхность резания. Он влияет на интенсивность износа резца и в сочетании с углом γ влияет на прочность режущего клина и условия отвода тепла из зоны резания.

Чем меньшую нагрузку испытывает режущий клин и чем он прочнее, тем больше значение угла α . Его величина зависит, таким образом, от сочетания свойств обрабатываемого и режущего материалов, от величины подачи и других условий резания. Например, для резцов из быстрорежущей стали при черновой обработке конструкционных сталей $\alpha=6\dots 8^\circ$, для чистовых операций – $\alpha=10\dots 12^\circ$.

Угол наклона главной режущей кромки λ – это угол между основной плоскостью, проведенной через вершину резца, и режущей кромкой. Он измеряется в плоскости резания и служит для предохранения вершины резца A от выкрашивания, особенно при ударной нагрузке, а также для изменения направления сходящей стружки. Угол λ считается положительным, когда вершина резца занижена по сравнению с другими точками главной режущей кромки и в контакт с заготовкой включается последней. Стружка при этом сходит в направлении обработанной поверхности (от точки B к точке A), что может существенно повысить ее шероховатость. При черновой обработке это допустимо, так как после нее следует чистовая операция, снимающая эти неровности. Но при чистовых операциях, когда нагрузка на режущий клин невелика, первостепенное значение приобретает задача отвода стружки от обработанной поверхности. С этой целью назначают отрицательные значения угла ($-\lambda$). При этом вершина резца A является наивысшей точкой режущей кромки, а стружка сходит в направлении от точки A к точке B .

Наличие угла λ усложняет заточку резцов. Поэтому практические значения этого угла невелики и находятся в пределах $\lambda = +5\dots -5^\circ$.

Углы в плане ϕ и ϕ_1 (главный и вспомогательный) – это углы между направлением продольной подачи $s_{пр}$ и, соответственно, проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость.

Главный угол в плане ϕ определяет соотношение между толщиной и шириной срезаемого слоя. При уменьшении угла ϕ стружка становится тоньше, улучшаются условия теплоотвода и тем самым повышается стойкость резца, но при этом возрастает радиальная составляющая силы резания. При обточке длинных заготовок малого диаметра это может

привести к их деформации и вибрациям. В этом случае принимается угол $\varphi=90^\circ$.

Для других случаев рекомендуется:

- при чистовой обработке $\varphi=10\dots20^\circ$;
- при черновой обработке валов ($\ell/d = 6\dots12$) $\varphi = 60\dots75^\circ$;
- при черновой обработке более жестких заготовок $\varphi = 30\dots45^\circ$.

Вспомогательный угол в плане φ_1 оказывает влияние на высоту h остаточных гребешков (шероховатости) на обработанной поверхности, величина которых возрастает с увеличением φ_1 и подачи s , так как

$$h = \frac{\text{stg}\varphi\text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\varphi + \text{tg}\varphi_1}$$

У проходных резцов обычно угол $\varphi_1=10\dots15^\circ$. С уменьшением угла φ_1 до 0° величина h также уменьшается до нуля, что позволяет значительно увеличить подачу, а следовательно, и производительность процесса резания.

Вспомогательный задний угол α_1 , измеряемый в сечении N_1-N_1 , перпендикулярном к вспомогательной режущей кромке, принимается примерно равным углу α . Он образует зазор между вспомогательной задней поверхностью и обработанной поверхностью заготовки.

Вспомогательный передний угол γ_1 определяется заточкой передней поверхности и на чертеже обычно не указывается.

С целью повышения прочности режущей части резца предусматривается также **радиус скругления его вершины** в плане: $r = 0,1\dots3,0$ мм. При этом большее значение радиуса применяется при обработке жестких заготовок, так как с увеличением этого радиуса возрастает радиальная составляющая силы резания.

При изготовлении и заточке резцов, кроме углов γ и α в сечении $N-N$, часто возникает необходимость в определении этих же углов в нормальном и продольном сечениях державки. Расчет углов в этих сечениях в зависимости от принятых значений α , γ , λ и φ может быть выполнен по формулам, приведенным в [11, 13, 22].

2.2. Особенности конструкции резцов других типов

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

Подрезные резцы (рис.2.3, а, б) изготавливают с отогнутой и прямой державками. Хотя отогнутая державка усложняет изготовление резцов, она обеспечивает следующие преимущества: 1) универсаль-

ность, так как проходные резцы могут работать напроход (1) и на подрезание (2); 2) возможность вести обработку в менее доступных местах.

Расточные резцы (рис.2.3, в, г) используют для обработки внут-

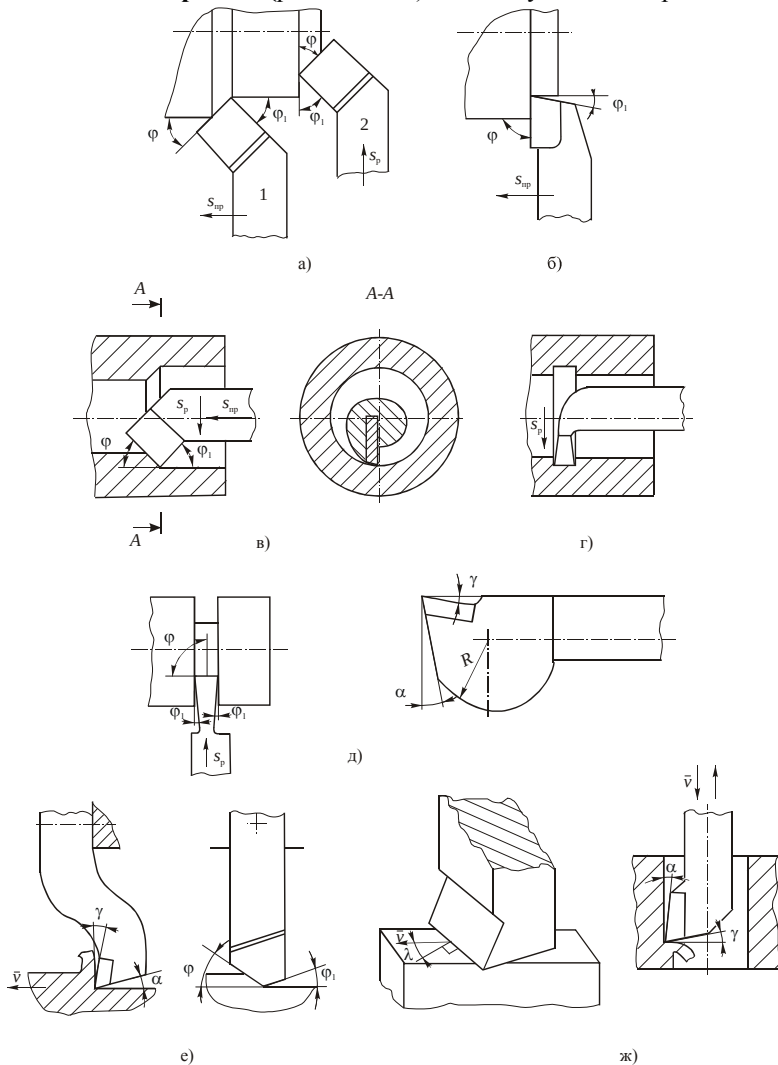


Рис.2.3. Типы резцов: а – подрезной (проходной отогнутый правый); б – подрезной (проходной упорный правый); в – расточной для сквозных отверстий; г – расточной канавочный; д – отрезной; е – строгальный; ж – долбежный

ренных 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 врезание задней поверхности резца в поверхность резания, лезвие резца располагают несколько ниже оси отверстия, а заднюю поверхность выполняют криволинейной формы.

Отрезные резцы (рис.2.3, *д*) применяют для отрезки заготовок из прутка и проточки наружных канавок в заготовках на токарных, револьверных станках и станках-автоматах.

Из-за тяжелых условий работы (большой вылет резца, затрудненные условия деформации металла при переходе в стружку, малая жесткость режущей части и, следовательно, низкая виброустойчивость) отрезные резцы чаще всего изготавливают из быстрорежущей стали. Режущая часть имеет главную режущую кромку с углом $\varphi = 90^\circ$ и две вспомогательные кромки с углами $\varphi_1 = 1^\circ 30' \dots 3^\circ$. Если нужно обработать торец заготовки без оставления стержня (бобышки) в ее центре, то главную режущую кромку затачивают под углом $\varphi = 75 \dots 80^\circ$.

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 $\gamma = 15 \dots 20^\circ$ с упрочняющей фаской шириной $f = 0,2 \dots 0,3$ мм и под углом $\gamma_\Phi = 0 \dots -5^\circ$, задний угол $\alpha = 10 \dots 12^\circ$.

Строгальные и долбежные резцы (рис.2.3, *е, ж*) – 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.

На рис.2.3, *е* показаны геометрические параметры строгальных резцов при несвободном и свободном резании (без вспомогательных кромок), а на рис.2.3, *ж* показаны углы γ и α долбежных резцов. На примере свободного строгания можно дать другое определение **угла наклона главной режущей кромки** λ – это угол между вектором скорости резания и нормалью к проекции главной режущей кромки на плоскость резания, которая в данном примере совпадает с обработанной поверхностью. Такое определение λ применимо также к другим видам инструмента, например к сверлам и фрезам.

Величины геометрических параметров строгальных и долбежных резцов обычно принимают близкими к принятым для токарных резцов, за некоторыми исключениями. Так, для предохранения выкрашивания вершины резцов при работе с ударами угол λ увеличивают до $10...12^\circ$. При несвободном строгании главный угол в плане рекомендуется брать равным $\phi = 20...45^\circ$. Для чистовых операций (под шабрение) желательно снижать угол ϕ_1 до нуля.

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. Целные 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 даже к поломкам пластин. Обычно применяемые технологические приемы по снятию напряжений: релаксация путем замедления скорости охлаждения, использование компенсационных прокладок и другие – не решают полностью этой проблемы. Избавиться от напряжений можно только путем применения 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 остродефицитных 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. Некоторые из них приведены на рис.2.4, а.

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

По геометрическим параметрам СМП делятся на: 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. 2.4, б).

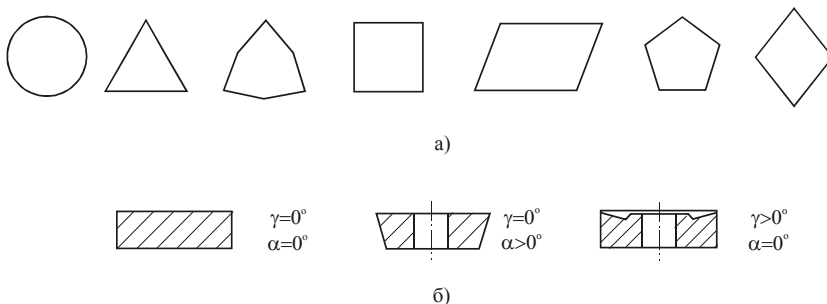


Рис.2.4. Твердосплавные сменные многогранные пластины (СМП): а – формы пластин; б – геометрические параметры пластин (негативных, позитивных, негативно-позитивных)

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 (по ISO): 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. Некоторые примеры конструктивного исполнения этих схем на резцах приведены на рис.2.5.

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 (рис.2.5, д), разработанные фирмой «Sandvik Coromant» (Швеция). Здесь крепление пластины осуществляется силами упругой деформации стенки паза державки.

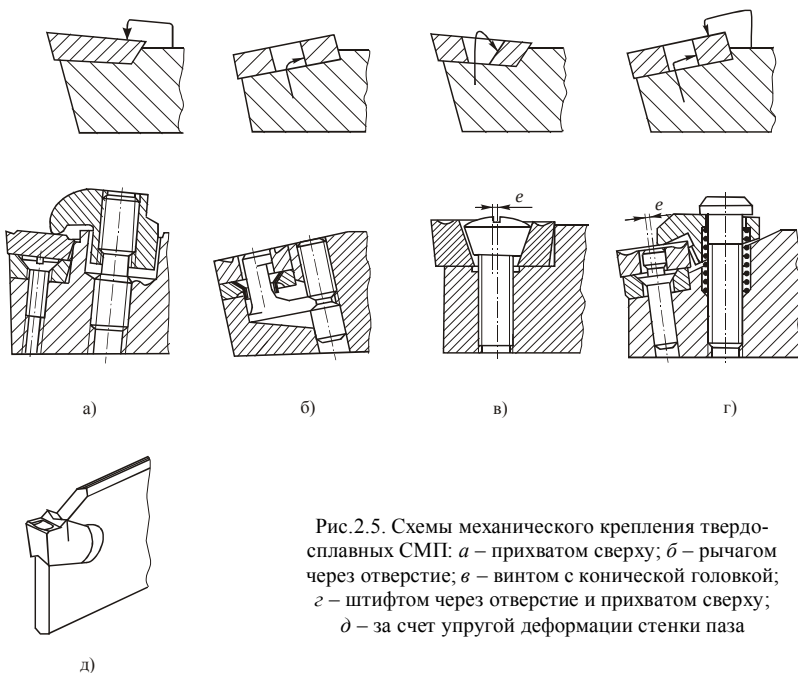


Рис.2.5. Схемы механического крепления твердосплавных СМП: а – прихватом сверху; б – рычагом через отверстие; в – винтом с конической головкой; г – штифтом через отверстие и прихватом сверху; д – за счет упругой деформации стенки паза

Резцы, оснащенные керамикой и синтетическими сверхтвёрдыми 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.

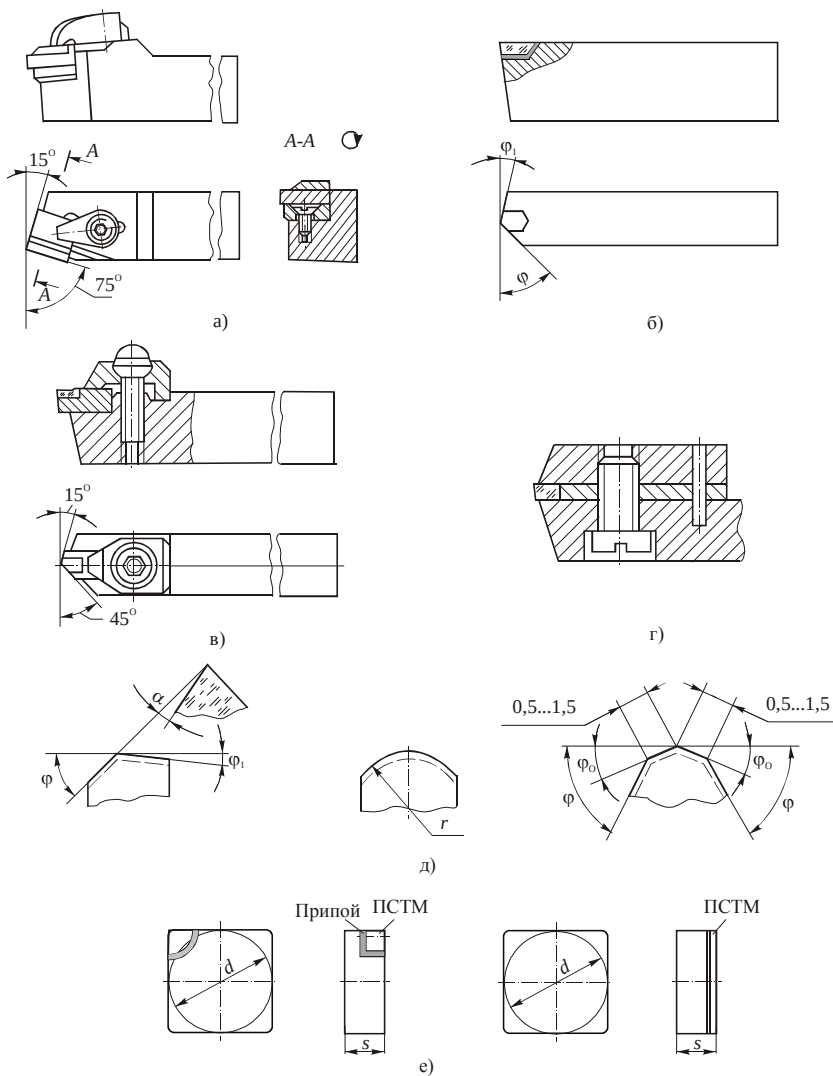


Рис.2.6. Сборные токарные резцы: *а* – с механическим креплением пластины из керамики; *б* – с припаянным кристаллом алмаза; *в* – с промежуточной вставкой; *г* – с механическим креплением кристалла алмаза; *д* – формы режущих кромок алмазных резцов (прямолинейная, радиусная, фасеточная); *е* – СМП с напайками из ПСТМ

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 (рис.2.6, а).

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, зачеканкой или механическим путем. Крепление алмаза пайкой осуществляется либо непосредственно в державку (рис.2.6, б), либо с применением промежуточных вставок (рис.2.6, в). В последнем варианте вставка прессуется и спекается вместе с алмазом методом порошковой металлургии. Механическое крепление алмаза показано на рис.2.6, г.

Геометрические параметры заточки алмазных резцов: $\gamma = 0 \dots -5^\circ$, $\alpha = 8 \dots 12^\circ$, $\varphi = 15 \dots 45^\circ$. Вершина резца в плане выполняется со скруглением $r = 0,2 \dots 0,8$ мм или с несколькими фасками (фасетками) (рис.2.6, д). 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 $Ra\ 0,08 \dots 0,32$ мкм и повысить точность обработки до $IT\ 5 \dots 7$. 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 $d = 4 \dots 12,7$ мм, толщиной 3...5 мм ($\gamma = 0$, $\alpha = 0 \dots 11^\circ$). 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 уголкам (рис.2.6, е). Такие пластины имеют более крупные размеры и их можно крепить механическим путем в державках, применяемых для крепления твердосплавных пластин.

2.3. Способы стружкозавивания и стружколомания при конструировании токарных резцов

Проблема надежного удаления стружки из зоны резания имеет наиболее острое значение при использовании твердосплавных резцов и особенно при обработке пластичных материалов, когда из-за резко возросших скоростей резания значительно увеличивается объем образующейся стружки и изменяется ее форма. Нагретая до высоких температур стружка в виде непрерывной ленты наматывается на заготовку и резец, портит обрабатываемую поверхность и представляет собой серьезную опасность для рабочих. Поэтому станочнику приходится часто останавливать станок для ее удаления. 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. Примеры таких устройств приведены на рис.2.7.

Лунки (рис.2.7, а) и уступы (рис.2.7, б), применяемые на черновых и полувальцовочных 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.

Хорошо показала себя заточка фасок переменной ширины вдоль главной и вспомогательной режущих кромок с отрицательным передним углом (рис.2.7, 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 (2.7, з) и регулируемые (2.7, д). Первые выполняются в виде пластины, напавиваемой сверху режущей пластины. В отличие от лунок и уступов, такой стружколом не снижает прочности режущей пластины, но требует предварительного экспериментального определе-

ния положения относительно главной режущей кромки. При переточке резцов необходима перепайка накладной пластины, что неудобно, поэтому такие стружколомы применяются крайне редко.

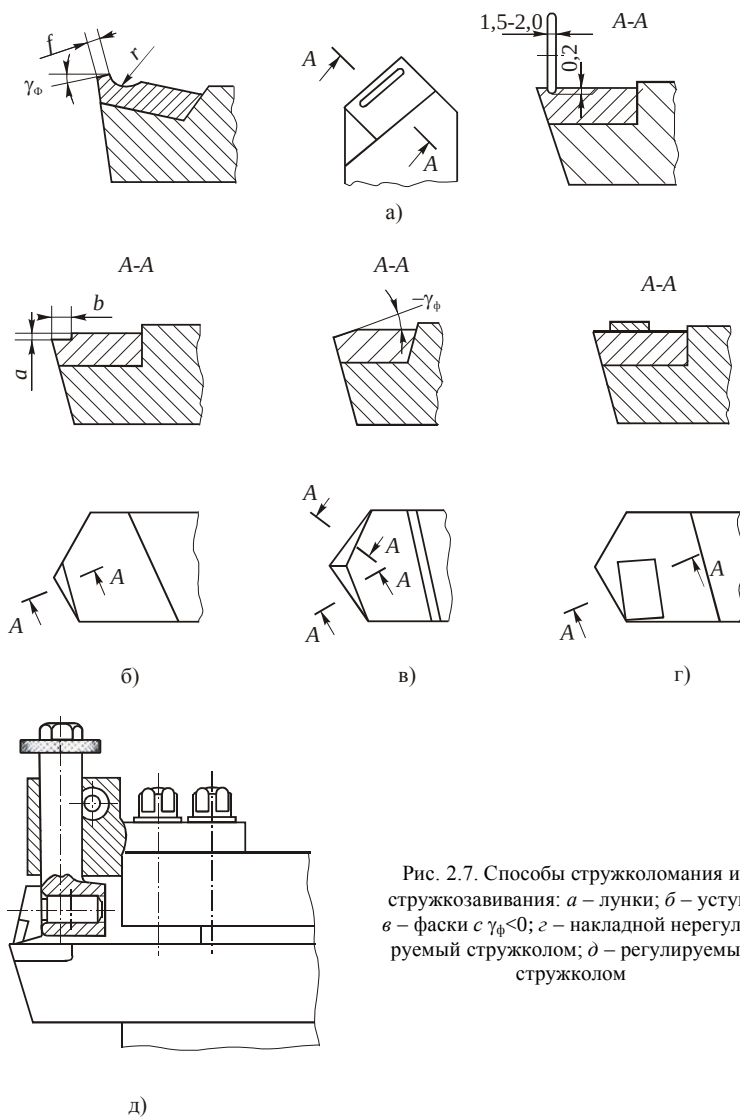


Рис. 2.7. Способы стружколомания и стружкозаивания: а – лунки; б – уступ; в – фаски с $\gamma_{\phi} < 0$; г – накладной нерегулируемый стружколом; д – регулируемый стружколом

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. Некоторые примеры оформления таких пластин приведены на рис.2.8. 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.

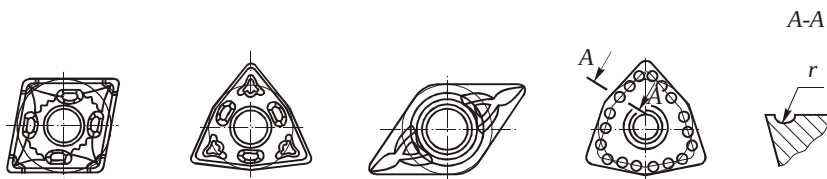


Рис.2.8. Некоторые виды передних поверхностей твердосплавных СМП

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.

2.4. Фасонные резцы

Эти резцы применяются для обработки тел вращения, имеющих наружные или внутренние фасонные поверхности. Обработка этими рез-

цами обычно ведется на станках-автоматах и revolverных 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 (рис.2.9, *а*), круглые (рис.2.9, *б*), призматические радиальные (рис.2.9, *в*), тангенциальные (рис.2.9, *г*). 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 затывания 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 помо-

щью ласточкина хвоста в державках стержневого типа, обладают большим запасом на переточку и, как будет показано ниже, обеспечивают большую точность обработки.

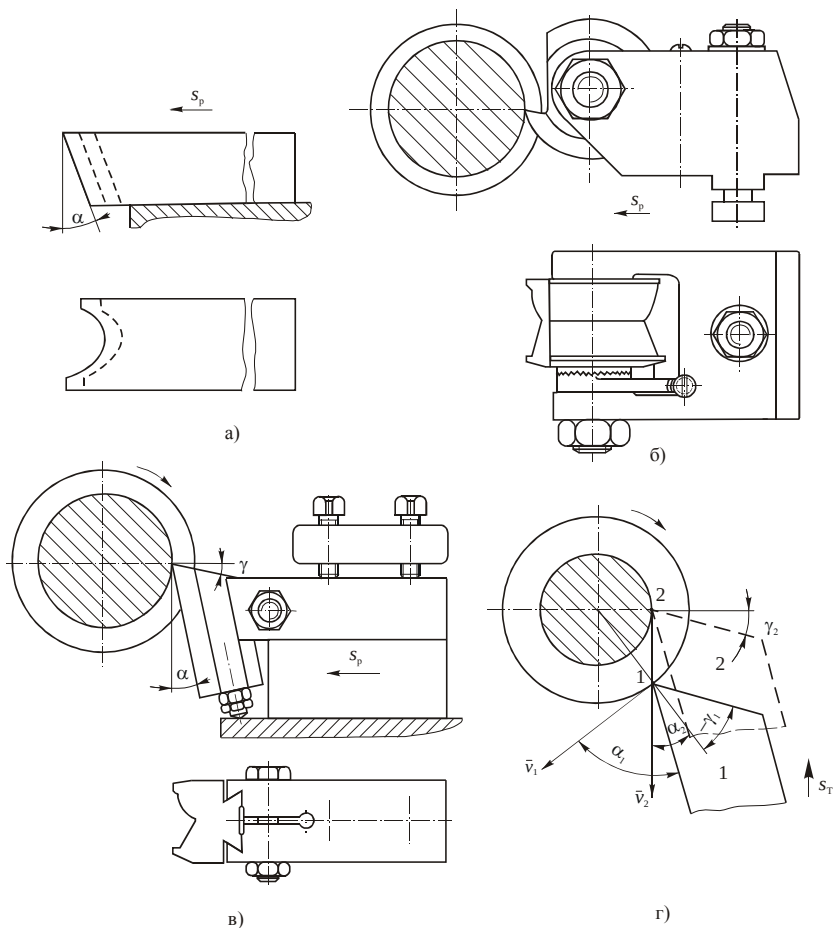


Рис.2.9. Типы фасонных резцов: а – стержневой; б – круглый; в – призматический; г – призматический тангенциальный

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

Особенностью фасонных резцов, работающих с радиальной подачей, является переменное значение передних и задних углов по длине режущей кромки.

У круглых резцов задний угол α создается за счет превышения центра резца O_p над центром детали O_d на величину h , а передний угол γ – за счет выреза по плоскости передней поверхности, отстоящей от центра на величину H (рис.2.10). При этом точки режущей кромки на наружной окружности резца (точки 1 и 3) лежат на линии оси центров станка:

$$\sin \alpha = h / R; \quad \sin(\alpha + \gamma) = \sin \psi = H / R,$$

где R – радиус наружной окружности резца.

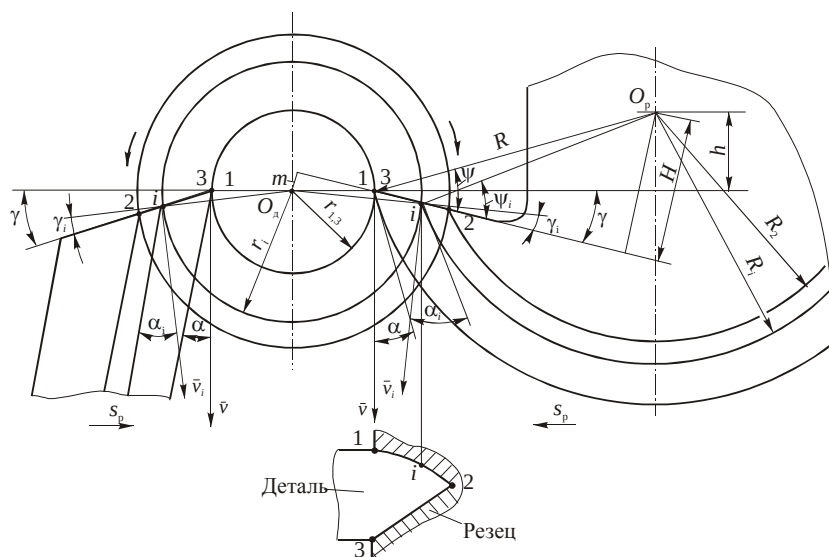


Рис.2.10. Геометрические параметры круглых (справа) и призматических (слева) фасонных резцов с радиальной подачей

В других точках режущей кромки углы α и γ в сечении, перпендикулярном к оси резца, зависят от положения координатных плоскостей (основной и резания) и касательных к задней и передней поверхностям. При этом след основной плоскости проходит через режущую кромку и радиус, проведенный в точку режущей кромки из центра детали, а след

плоскости резания проходит через вектор окружной скорости резания v . Касательная к задней поверхности в разных точках режущей кромки – это нормаль к радиусу, проведенному из центра резца O_p .

Из сказанного следует, что по мере приближения точки режущей кромки к центру резца происходит поворот координатных плоскостей по часовой стрелке и в любой i -й точке, отстоящей от вершины ближе к центру резца, задний угол $\alpha_i > \alpha$, а $\gamma_i < \gamma$. Касательные к задней поверхности у круглых резцов также поворачиваются, но в противоположном направлении, т.е. против часовой стрелки. Для расчета переднего угла в любой i -й точке режущей кромки резца опустим перпендикуляр m из центра детали O_d на продолжение передней поверхности резца и найдем, что

$$m = r_1 \sin \gamma = r_i \sin \gamma_i, \text{ т.е. } \sin \gamma_i = \frac{r_i}{r_1} \sin \gamma, \quad (2.1)$$

где r_i, r_1 – радиусы точек профиля детали, задаваемые чертежом.

На рис.2.10 с левой стороны показано положение призматического резца в процессе резания. При изготовлении этих резцов производится срез по передней грани под углом $\gamma + \alpha$, а задний угол α в рабочем положении создается путем поворота резца относительно детали. Приведенные выше формулы (2.1), полученные для круглого резца, справедливы и для призматического резца.

Задние углы (α_N) на наклонных режущих кромках принято измерять в сечениях, нормальных к этим кромкам. Во избежание трения задних поверхностей с обработанной поверхностью заготовки они должны быть не менее $1 \dots 2^\circ$.

На примере призматического резца (рис.2.11, а) с $\gamma = 0$ и прямолинейным фасонным профилем найдем, что на участке, параллельном оси детали,

$$\operatorname{tg} \alpha = x / A,$$

а на наклонном участке режущей кромки в нормальном сечении

$$\operatorname{tg} \alpha_N = y / A.$$

Так как $y = x \sin \varphi$, где φ – угол между режущей кромкой и нормалью к оси заготовки, то

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi. \quad (2.2)$$

Из уравнения (2.2) следует, что при $\varphi \rightarrow 0$ и $\alpha \rightarrow 0$ угол $\alpha_N \rightarrow 0$. Во избежание трения боковых задних поверхностей с обработанной поверхностью заготовки участки режущих кромок, перпендикулярные к оси заготовки, выполняют либо с углом поднутрения $\varphi_1 = 1^\circ 30' \dots 3^\circ$, либо на них оставляют узкие ленточки шириной $f = 0,5 \dots 1,0$ мм (рис.2.11, б). При открытых поверхностях возможно изготовление резцов с винтовыми задними поверхностями либо с поворотом оси резца относительно оси заготовки (рис.2.11, в). В последнем случае на участке ab , перпендикулярном к оси детали, $\varphi > 0$ и, следовательно, $\alpha_N > 0$.

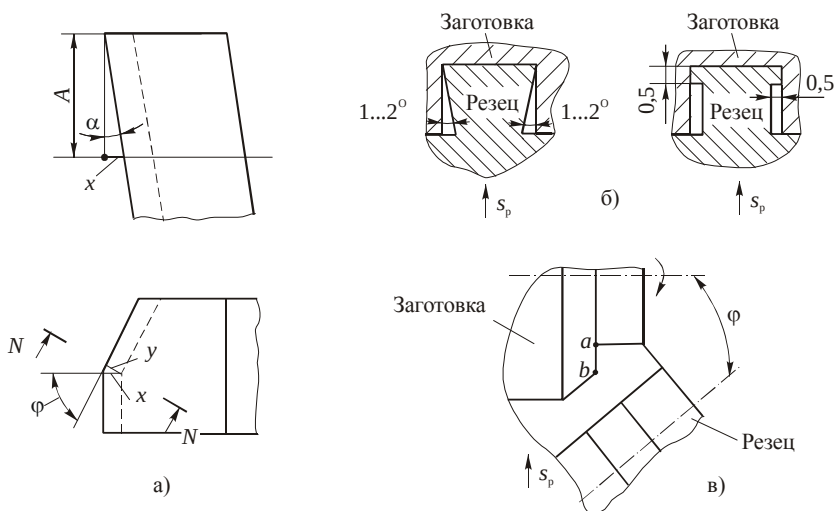


Рис.2.11. Задние углы фасонных резцов: а – задний угол на наклонных режущих кромках; б – поднутрение участков режущих кромок, перпендикулярных к оси заготовки; в – резец с наклонным профилем

Профилирование фасонных резцов (аналитический расчет профиля) необходимо для их изготовления и проектирования инструментов второго порядка, а также шаблонов и контршаблонов, применяемых для контроля соответственно профилей резцов и шаблонов. При этом профиль круглого резца рассчитывается в радиальном (осевом) сечении, а призматического резца – в сечении, нормальном к задней поверхности.

Из-за наличия переменных значений углов α и γ глубина (высота) точек профиля резца в этих сечениях не совпадает с глубиной профиля детали в ее осевом сечении. Расчет ведется путем определения высот-

ных координат характерных (узловых) точек профиля, отсчитываемых от базовой точки, за которую принимается наивысшая точка профиля (вершина резца). Осевые размеры профиля передаются от детали без искажения.

Профилирование круглых фасонных резцов. Исходные данные для расчета профиля резца: обрабатываемый материал и профиль детали, задаваемый радиусами окружностей, проходящих через узловые точки $r_1, r_2, \dots, r_i$, и осевыми размерами $a_1, a_2, \dots, a_i$. По рекомендациям [23 и др.] выбирают углы вершинной точки γ и α и радиус наружной окружности резца R . Исходя из поставленной задачи, требуется рассчитать радиусы окружностей, на которых лежат точки резца, обрабатывающие соответствующие точки детали $R_1, R_2, \dots, R_i$ и высотные координаты профиля резца в его осевом сечении $\Delta R_i = R - R_i$ (рис.2.12, а).

Предварительно определяют параметры вершины резца (точка 1), лежащей на линии центров станка по заданным исходным значениям:
 $h_1 = R \sin \alpha$; $m = r_1 \sin \gamma$; $\psi_1 = \alpha + \gamma$; $A_1 = r_1 \cos \gamma$; $H = R \sin \psi_1$;
 $B_1 = R \cos \psi_1$.

Далее, используя значения этих параметров, для любой i -й точки профиля находят последовательно:

$$\sin \gamma_i = m / r_i ; \quad (2.3)$$

$$C_i = r_i \cos \gamma_i - A_1 ; \quad (2.4)$$

$$B_i = B_1 - C_i ; \quad (2.5)$$

$$\operatorname{tg} \psi_i = H / B_i ; \quad (2.6)$$

$$R_i = H / \sin \psi_i ; \quad (2.7)$$

$$\Delta R_i = R - R_i . \quad (2.8)$$

Здесь параметры A_i , B_i и C_i переменны и измеряются вдоль передней грани резца, а угловой параметр $\psi_i = \alpha_i + \gamma_i$ определяется с использованием их величин.

Профилирование призматических резцов производится на основе тех же исходных данных и заключается в определении высотных координат P_i узловых точек профиля резца в сечении, перпендикулярном к задней поверхности инструмента. Из расчетной схемы на рис.2.12, б следует, что для этого достаточно иметь три уравнения:

$$\sin \gamma_i = m / r_i ; \quad (2.9)$$

$$C_i = r_i \cos \gamma_i - A_1; \quad (2.10)$$

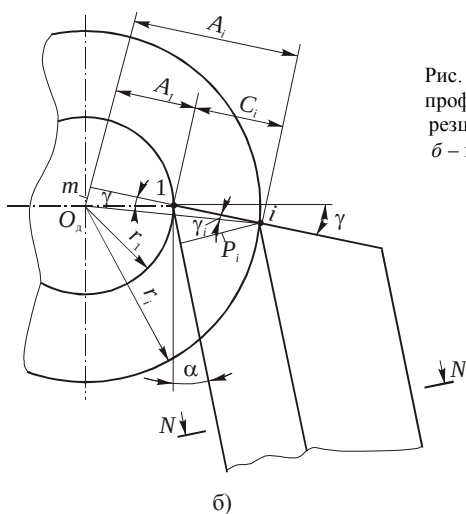
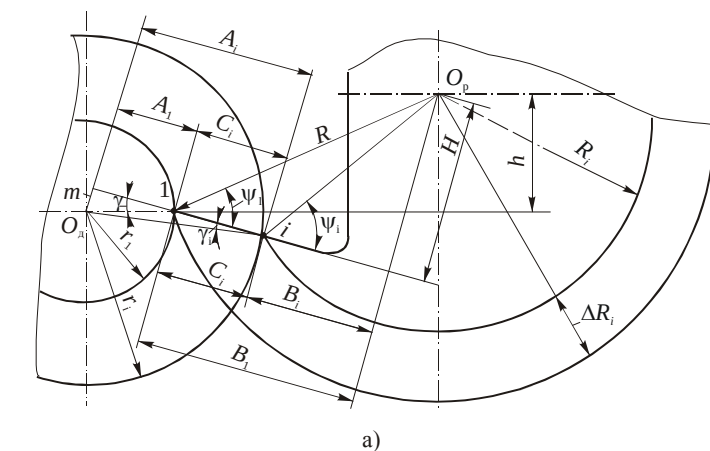


Рис. 2.12. Расчетные схемы профилирования фасонных резцов: а – круглый резец; б – призматический резец

$$P_i = C_i \cos(\alpha + \gamma). \quad (2.11)$$

Здесь по аналогии с круглыми резцами предварительно находят значения параметров m и A_1 . Координаты узловых точек вдоль оси передаются от детали к резцу без искажения.

По найденным координатам узловых точек в указанных сечениях на рабочих чертежах фасонных резцов вычерчивают профиль, обычно в

увеличенном масштабе. При этом прямолинейные участки профиля получают соединением прямой двух крайних точек, а криволинейные – по лекалу через точки отдельных отрезков, на которые предварительно разбивают заданный профиль детали. Обычно берут не менее трех–четырёх точек.

Погрешности обработки фасонными резцами возникают при обработке конических участков детали из-за несовпадения режущей кромки с образующей конуса.

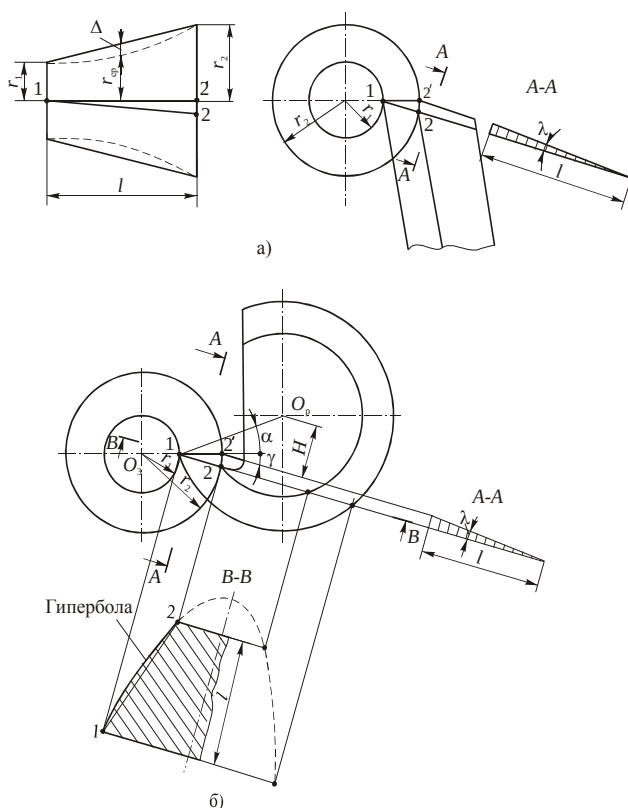


Рис.2.13. Погрешности профиля конических участков заготовок, обработанных фасонными резцами: а – призматический резец; б – круглый резец

Как следует из рис.2.13, а, при обточке усеченного конуса призматическим резцом режущая кромка 1...2 скрещивается в пространстве с

осью конуса и при вращении ее относительно оси детали образуется не конус, а однополостной гиперболоид, показанный штриховыми линиями. Наибольшее отклонение фактического профиля от конического Δ приходится на точку профиля с радиусом $r_{\text{ср}} = (r_1 + r_2)/2$.

Погрешность $\Delta = r_{\text{ср}} - r_{\text{ф}}$, где $r_{\text{ф}}$ – фактический радиус средней точки гиперболоида, который можно найти по формулам аналитической геометрии. При этом величина погрешности Δ не должна превышать допуск на отклонение образующей конуса. В случае применения призматических резцов ее можно свести до нуля, заточив переднюю грань дополнительно под углом λ . При этом режущая кромка резца займет положение $1\dots 2'$, т.е. будет совпадать с образующей конуса.

Из рис.2.13, а следует, что

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{(r_2 - r_1) \sin \gamma}{\ell},$$

где ℓ – длина конуса.

Такой прием, однако, не дает возможности получить точный конический профиль детали при использовании круглых фасонных резцов. Это объясняется тем, что при пересечении конического тела резца плоскостью передней грани, проходящей параллельно оси, получается криволинейная режущая кромка в форме гиперболы (рис.2.13, б). Дополнительная заточка передней грани под углом λ хотя несколько снижает погрешность обработки, но совместить полностью режущую кромку с образующей конуса не удастся.

Теоретически можно рассчитать профиль резца по нескольким точкам конической поверхности детали, определив их радиусы в сечениях, перпендикулярных к оси, но тогда профиль исходного тела резца будет криволинейным. Из-за высокой трудоемкости точное изготовление таких резцов считается нерациональным. Заточка же передней грани круглых резцов под углом λ хотя и не исключает погрешности обработки конических участков детали, но дает существенное ее снижение.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Геометрические параметры резцов на примере токарных проходных резцов. Определение координатных плоскостей и углов γ , α , α_1 , ϕ и ϕ_1 .
2. Типы резцов и их основные геометрические параметры в связи с кинематикой процесса резания.

3. Особенности конструкций твердосплавных резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП). Их достоинства по сравнению с напайными пластинами. Типы СМП и способы их крепления.
4. Особенности конструкции и геометрические параметры резцов, оснащенных алмазами, керамикой и сверхтвердыми материалами.
5. Какими способами осуществляется стружкозавивание и стружколомение при точении?
6. Типы фасонных резцов, их назначение, способы крепления на станке, переточка.
7. Дайте определение передних и задних углов фасонных резцов.
8. Как влияет угол наклона главной режущей кромки фасонных резцов в основной плоскости на величину задних углов? Какими способами можно избежать нулевых задних углов?
9. Аналитический способ профилирования круглых фасонных резцов.
10. Расчет профиля призматических фасонных резцов по заданному профилю детали.
11. Причины погрешностей профиля, обработанных фасонными резцами. Как их можно избежать или уменьшить?

3. ПРОТЯЖКИ

3.1. Назначение, основные типы и области применения протяжек

Протяжки – это многозубые высокопроизводительные инструменты, нашедшие широкое применение в серийном и особенно в массовом производствах. Они относятся к инструментам с конструктивной подачей, так как при протягивании движение подачи отсутствует.

Деление припуска между зубьями протяжки осуществляется за счет превышения по высоте или ширине каждого последующего зуба относительно предыдущего. Превышение по высоте, определяющее толщину срезаемого слоя a_z , называется **подъемом** или **подачей на зуб**. Деление припуска по ширине осуществляется с целью облегчения процесса резания и используется в протяжках с групповой схемой резания.

Протяжки, применяемые для обработки отверстий различных форм, называются **внутренними протяжками**. Для обработки наружных поверхностей, т.е. поверхностей с открытым незамкнутым контуром, применяют **наружные протяжки**.

Главное движение протяжки, обеспечивающее процесс резания, чаще всего прямолинейное, поступательное. Реже встречаются протяжки с вращательным или винтовым главным движением.

Процесс протягивания осуществляется на специальных горизонтальных или вертикальных протяжных станках.

На рис.3.1 показано несколько схем протягивания:

- при обработке отверстий (рис.3.1, *а*) и наружных поверхностей (рис.3.1, *б*) с возвратно-поступательным движением инструмента и неподвижной заготовкой;
- при непрерывном протягивании наружных поверхностей с автоматической загрузкой и выгрузкой заготовок, перемещающихся относительно неподвижной протяжки (рис.3.1, *в*);
- при обработке тел вращения плоскими или круглыми протяжками (здесь главное движение или прямолинейное, или вращательное, при этом протяжка совершает один оборот) (рис.3.1, *г*);

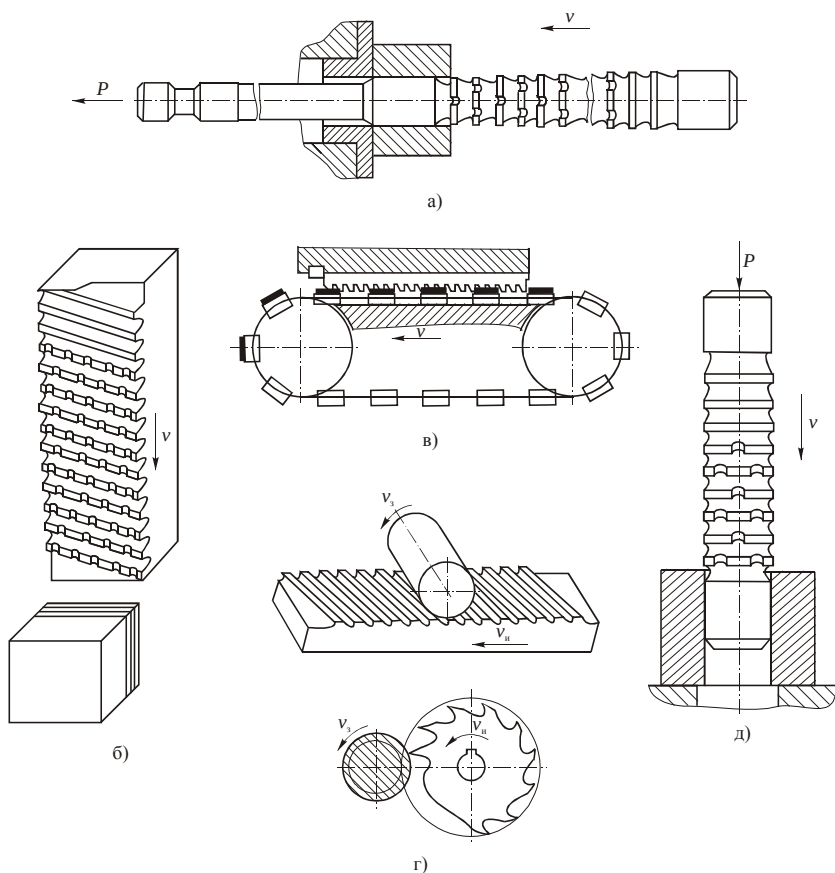


Рис.3.1. Схемы протягивания: *а* – отверстий; *б* – плоскостей; *в* – непрерывное протягивание наружной поверхности; *г* – обработка цилиндрической поверхности плоской и круглой протяжками; *д* – обработка отверстия прошивкой

- при обработке отверстий **прошивками** (рис.3.1, *д*) сила приложена к торцу инструмента и, таким образом, прошивки работают на сжатие. Для обеспечения продольной устойчивости прошивок их длина не должна превышать 15 диаметров. По конструкции прошивки подобны протяжкам.

Встречаются и другие схемы протягивания, которые, как и сам инструмент, постоянно совершенствуются.

Впервые протяжки появились в 30-х годах XX столетия и нашли широкое применение благодаря следующим достоинствам процесса протягивания:

1) высокая производительность, так как в процессе резания снимается припуск одновременно несколькими зубьями. При этом активная длина режущих кромок очень большая, хотя скорость резания невелика (6...12 м/мин). Так, например, при протягивании отверстия диаметром 30 мм одновременно пятью зубьями ширина срезаемого слоя составляет около 470 мм. В целом производительность при протягивании в 3...12 раз выше, чем при других видах обработки;

2) высокая точность ($IT\ 7... IT8$) и низкая шероховатость ($Ra\ 0,32...2,5\ \mu\text{м}$) обработанных поверхностей благодаря наличию черновых, чистовых и калибрующих зубьев, а в некоторых конструкциях протяжек еще и выравнивающих зубьев. Протягивание заменяет фрезерование, строгание, зенкерование, развертывание, а иногда и шлифование;

3) высокая стойкость инструмента, исчисляемая несколькими тысячами деталей. Это достигается благодаря оптимальным условиям резания и большим запасам на переточку;

4) простота конструкции станков, так как при протягивании отсутствует движение подачи, поэтому станки не имеют коробок подач, а главное движение осуществляется с помощью силовых гидроцилиндров.

К недостаткам протяжек можно отнести:

1) высокие трудоемкость и стоимость инструмента из-за сложности конструкций протяжек и высоких требований к точности их изготовления;

2) протяжки – это специальные инструменты, предназначенные для изготовления деталей только одного типоразмера;

3) высокие затраты на переточку, обусловленные сложностью конструкций этих инструментов.

Отсюда экономическая эффективность применения протяжек достигается лишь в массовом и серийном производствах. Однако даже на предприятиях с единичным и мелкосерийным производствами протяжки могут дать значительный экономический эффект при обработке сложных фасонных отверстий, если формы обрабатываемых поверхностей и их размеры имеют узкие допуски. Например, при протягивании многошлицевых отверстий экономически оправдано применение протяжек даже при партии 50 деталей в год, а круглых отверстий – не менее 200 деталей.

При проектировании протяжек необходимо иметь в виду следующие особенности их работы:

1) протяжки испытывают очень большие растягивающие нагрузки, поэтому внутренние протяжки обязательно проверяют на прочность по наиболее слабым сечениям;

2) срезаемая при протягивании стружка должна свободно размещаться в стружечных канавках в течение всего времени нахождения режущих зубьев в контакте с заготовкой и свободно выходить из канавки после прекращения процесса резания. Поэтому вопросы размещения и разделения стружки по ширине требуют большого внимания. Так, например, при протягивании круглых отверстий не допускаются кольцевые стружки, потому что для освобождения от них протяжек потребовались бы большие затраты времени;

3) длина протяжек должна соответствовать рабочему ходу протяжного станка, а также возможностям оборудования для их термической и механической обработки. При этом протяжки должны иметь достаточную жесткость при изготовлении и эксплуатации, поэтому при протягивании иногда используют люнеты и другие приспособления.

Из всех разновидностей внутренних протяжек наибольшее применение (до 60%) нашли протяжки для обработки круглых отверстий. Поэтому ниже будут рассмотрены основы проектирования именно этих протяжек. Для других типов протяжек (гранные, шлицевые, наружные) будут рассмотрены только отличительные особенности расчета их режущей части.

3.2. Протяжки для обработки отверстий

Конструктивные элементы протяжек. Протяжки состоят из следующих основных частей: хвостовика, шейки, передней и задней направляющих, режущей и калибрующей частей, заднего хвостовика (рис.3.2).

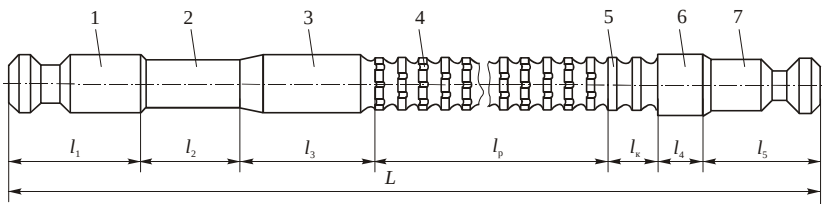


Рис.3.2. Конструктивные элементы протяжки для обработки отверстий: 1 – хвостовик; 2 – шейка; 3 – передняя направляющая; 4 – режущая часть; 5 – калибрующая часть; 6 – задняя направляющая; 7 – задний хвостовик

Хвостовик служит для присоединения протяжки к патрону станка. Основные типы и размеры хвостовиков стандартизированы (ГОСТ 4044–70). При этом диаметр хвостовика должен быть меньше диаметра отверстия под протягивание на 1...2 мм.

Шейка и следующий за ней **переходный конус** выполняют вспомогательную роль. Их длина должна обеспечивать возможность присоединения протяжки к патрону перед началом протягивания. Переходный конус обеспечивает свободное вхождение передней направляющей в протягиваемое отверстие. Диаметр шейки берется меньше диаметра хвостовика на 0,3...1,0 мм.

Передняя направляющая служит для центрирования оси заготовки относительно оси протяжки перед протягиванием, чтобы исключить перекося заготовки, который может привести к поломке протяжки или порче обработанной поверхности. Длина передней направляющей должна быть равна длине L_0 протягиваемого отверстия, а при больших длинах – не менее $0,6L_0$. Форма передней направляющей должна соответствовать форме отверстия в заготовке, а допуск на диаметр направляющей берется по $e8$.

Задняя направляющая выполняет ту же роль, что и передняя, предохраняя протяжку от перекося при выходе ее калибрующей части из обработанного отверстия. По длине она несколько меньше длины передней направляющей, а ее диаметр выполняется точнее, с допуском по $f7$. Форма задней направляющей должна быть такой же, как у протянутого отверстия.

Для автоматического возврата протяжки в исходное положение после протягивания, особенно при больших длине и диаметре протяжки, после задней направляющей иногда предусматривается **задний хвостовик**, закрепляемый в патроне каретки станка. По форме он подобен переднему хвостовику. Наличие этого хвостовика также предохраняет протяжку от провисания и перекося в отверстии и позволяет избежать искажения формы и размера обработанного отверстия.

Режущая (рабочая) часть протяжки служит для удаления припуска и формирования поверхности протянутого отверстия. Она содержит черновые и чистовые, а при групповой схеме резания еще и переходные зубья, располагаемые на ступенчато-конической поверхности. Длина режущей части равна произведению числа зубьев на их шаг, который, в свою очередь, зависит от требований к точности протягиваемого отверстия, шероховатости его поверхности и величины снимаемого припуска. Диаметры зубьев рассчитывают исходя из принятой схемы резания.

Калибрующая часть содержит 4...10 зубьев одинакового диаметра, равного диаметру последнего чистового зуба, и служит для калибровки отверстия, уменьшения рассеивания его размеров, а также является запасом на переточку: по мере износа чистовых зубьев калибрующие зубья заточкой могут быть переведены в чистовые. Тем самым увеличивается общий срок службы протяжки.

Калибрующие зубья припуск не срезают, а удаляют микронеровности поверхности, остающиеся после прохода чистовых зубьев, и обеспечивают направление протяжки в отверстии.

Конструкция режущей части протяжки определяется принятой **схемой резания**, под которой понимают принятый порядок последовательного срезания припуска.

Различают следующие схемы резания: а) по способу деления припуска по толщине и ширине – одинарная и групповая; б) по способу формирования обработанной поверхности – профильная, генераторная и комбинированная.

Рассмотрим первые две схемы на примере обработки круглых отверстий.

Одинарная схема резания характерна тем, что каждый зуб протяжки срезает припуск определенной толщины по всему периметру обрабатываемого отверстия за счет того, что диаметр каждого последующего зуба больше диаметра предыдущего на величину $2a_z$, где a_z – подъем или подача на зуб ($a_z = s_z$).

Так как кольцевая стружка недопустима, то для деления стружки по ширине на режущих кромках необходимо делать стружкоделительные канавки V-образной формы (рис.3.3, а), которые располагают в шахматном порядке при переходе от одного зуба к другому. Стружкоделительные канавки имеют глубину $h_k = 0,4 \dots 1,0$ мм и ширину $s_k = 0,6 \dots 1,2$ мм в зависимости от диаметра протяжки. Снимаемые каждым зубом стружки получают в виде отдельных частей с ребром жесткости толщиной $2a_z$ за счет того, что на участке канавки предыдущего зуба стружка не снимается. Ребро жесткости ухудшает свертываемость стружки в канавках между зубьями, из-за чего приходится значительно снижать величину подачи на зуб. Это приводит к нежелательному увеличению длины протяжки. Так, для цилиндрических протяжек ориентировочные значения толщин среза равны: при обработке сталей – $a_z = 0,02 \dots 0,04$ мм; чугуна – $a_z = 0,03 \dots 1,0$ мм; алюминия – $a_z = 0,02 \dots 0,05$ мм; бронзы и латуни – $a_z = 0,05 \dots 0,12$ мм.

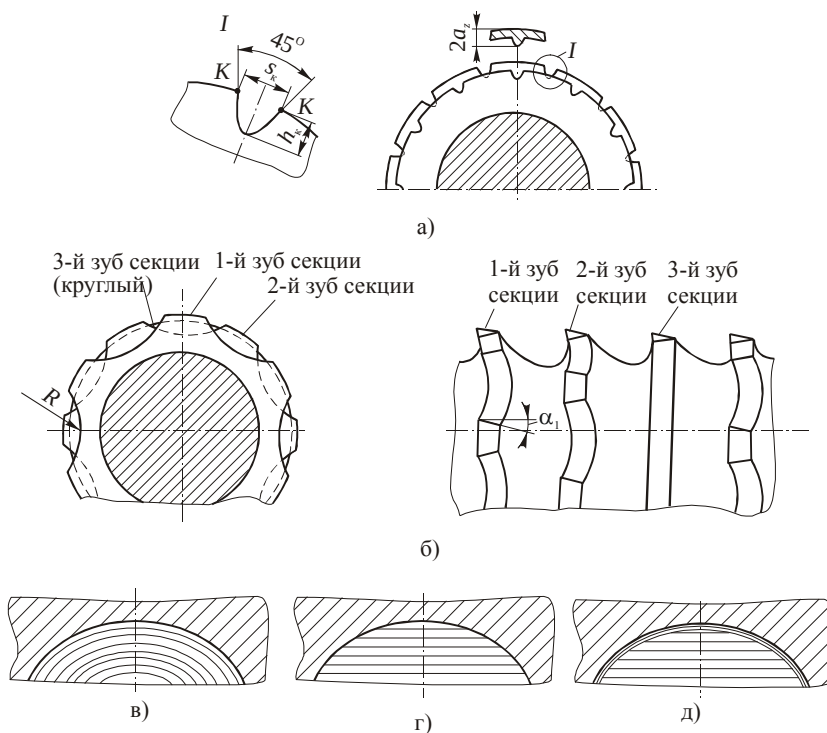


Рис.3.3. Схемы резания, применяемые при протягивании: а – одинарная; б – групповая; в – профильная; г – генераторная; д – комбинированная

При большей толщине среза жесткость стружки мешает ее завиванию во впадине между зубьями. Стружка упирается в дно впадины, в результате чего возможны ее заклинивание и даже поломка протяжки.

Стружкоделительные канавки прорезают шлифовальным кругом при небольшом ($2...3^\circ$) поднятии заднего центра протяжки для создания заднего угла по дну канавки. При этом ослабевают режущие кромки зубьев в точках К пересечения канавок с задней поверхностью. Это приводит к более интенсивному износу зубьев на этих участках и, соответственно, к снижению стойкости протяжки.

Схема группового резания (рис.3.3, б) отличается от вышеописанной тем, что все режущие зубья делятся на группы или секции, состоящие из $2...5$ зубьев, в пределах которых зубья имеют одинаковый диаметр. Припуск по толщине делится между группами зубьев, а по шири-

не – между зубьями группы благодаря широким выкружкам, выполненным в шахматном порядке. Каждый зуб снимает отдельные части припуска участками режущей кромки, где нет выкружек. При этом благодаря большой ширине выкружек снимаемая стружка не имеет ребер жесткости, хорошо скручивается в канавках между зубьями, даже при увеличении толщины среза до $a_z = 0,3 \dots 0,4$ мм при обработке стали и до $a_z = 1,0 \dots 1,2$ мм – при обработке чугуна. За счет этого при групповой схеме резания возможно существенное сокращение длины режущей части протяжки.

Широкие выкружки на зубьях обеспечивают увеличение угла стыка выкружек и режущих кромок до $130 \dots 150^\circ$. Это в сочетании с задними углами $\alpha_1 = 4 \dots 6^\circ$ на вспомогательных режущих кромках, полученными при вышлифовывании выкружек, обеспечивает повышение стойкости протяжек в 2...3 раза по сравнению с одинарной схемой резания.

При проектировании протяжек с групповой схемой резания последний зуб в группе, не имеющий выкружек и выполняющий роль зачистного, делают с занижением на $0,02 \dots 0,04$ мм по диаметру относительно других зубьев. Это необходимо, чтобы избежать образования кольцевых стружек, возможных при упругом восстановлении обработанной поверхности после прохода прорезных зубьев.

Недостатком групповой схемы резания является повышенная трудоемкость изготовления протяжки по сравнению с одинарной схемой.

Форма режущих кромок зубьев протяжки определяется принятой схемой формирования обработанной поверхности.

При **профильной схеме** (рис.3.3, в) контур всех режущих кромок подобен профилю протягиваемого отверстия. При этом в окончательном формировании обработанной поверхности принимают участие только последние зубья, а остальные служат для удаления припуска. При сложной форме отверстий использование такой схемы нецелесообразно, так как усложняет изготовление протяжки. Профильная схема в основном применяется при формировании простых по форме поверхностей, например, круглых или плоских.

При использовании **генераторной схемы** (рис. 3.3, г) форма режущих кромок не совпадает с формой обработанной поверхности, которая формируется последовательно всеми зубьями. В этом случае упрощается изготовление протяжки путем шлифования напроход всех зубьев абразивным кругом одного профиля. Однако при этом на обработанной поверхности возможно появление рисков (ступенек) вследствие погрешностей заточки зубьев, что ухудшает качество обработанной поверхности.

При высоких требованиях к шероховатости обработанной поверхности рекомендуется использовать **комбинированную схему** (3.3, *д*), при которой два–три последних режущих и калибрующие зубья работают по профильной, а остальные – по генераторной схемам.

Формы и размеры зубьев и стружечных канавок. Геометрические параметры зубьев. Проверочные расчеты при проектировании внутренних протяжек. Работоспособность протяжки во многом зависит от выбранной формы зубьев и размеров стружечных канавок.

Зубья протяжки должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) размеры зубьев должны обеспечивать возможно большее количество переточек;
- 2) зуб должен иметь определенный запас прочности и тем самым противостоять действующим на него силам;
- 3) форма и размеры стружечной канавки должны обеспечивать завивание стружки в плотный виток, а объем канавки должен быть достаточным для свободного размещения стружки, срезаемой за время контакта зуба с заготовкой;
- 4) иметь геометрию, при которой обеспечивается наибольшая стойкость протяжки.

Увеличение размеров зубьев и стружечных канавок ограничивается допустимыми значениями длины протяжки и ее прочностью.

На рис.3.4, *а, б, в* показаны профили зубьев и стружечных канавок, нашедшие наибольшее применение на практике: с прямолинейной и криволинейной спинками, с канавкой удлиненной формы.

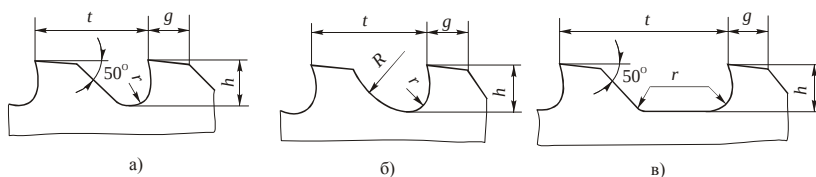


Рис.3.4. Профиль режущих зубьев и стружечных канавок протяжек: *а* – с прямолинейной спинкой; *б* – с криволинейной спинкой; *в* – с канавкой удлиненной формы

Зубья с прямолинейной спинкой проще в изготовлении, но с точки зрения условий завивания и размещения стружки уступают форме с криволинейной спинкой. Они используются в основном у протяжек с одинарной схемой резания при обработке сталей и хрупких материалов (чугун, бронза и др.).

При обработке стали и других пластичных металлов протяжками с групповой схемой резания, когда снимаются толстые стружки, рекомендуется использовать **зубья с криволинейной спинкой**, плавно сопрягающейся с передней поверхностью зуба.

Удлиненную форму стружечной канавки рекомендуется применять при обработке глубоких отверстий и отношении $h/t \leq 0,35$. Основные размеры зубьев и стружечных канавок с прямолинейной и криволинейной спинками ориентировочно можно определить по следующим соотношениям:

$h=(0,35 \dots 0,40)t$; $r=(0,50 \dots 0,55)h$; $g=(0,30 \dots 0,35)t$; $R=(0,65-0,80)t$,
а для стружечных канавок удлиненной формы:

$$h=(0,15 \dots 0,20)d$$
; $r=0,5h$, $g=(1,5 \dots 1,6)\sqrt[3]{d}$,

где h – глубина канавки; t – шаг зубьев; g – длина задней грани зуба; r и R – радиусы закруглений; d – диаметр протяжки.

Значение h уточняется при проверке канавок на помещаемость стружки.

Поверхности канавок рекомендуется полировать в целях улучшения завивания стружки и легкого освобождения от нее после прекращения процесса резания.

Передний угол γ выбирается по рекомендациям [27] в зависимости от обрабатываемого материала. Так, для сталей разных групп обрабатываемости $\gamma = 10 \dots 20^\circ$, для чугунов разной твердости $\gamma = 4 \dots 10^\circ$, для алюминия и меди $\gamma = 12 \dots 15^\circ$.

Учитывая, что зубья внутренних протяжек перетачиваются только по передней поверхности и при переточке их диаметр уменьшается, на черновых зубьях **задний угол** $\alpha = 3^\circ$, на чистовых – $\alpha = 2^\circ$, а на калибрующих – $\alpha = 0 \dots 1^\circ$. Эти значения задних углов значительно меньше оптимальных, в результате чего снижается стойкость инструмента. Однако увеличивать их нельзя, так как это привело бы к быстрой потере размера протяжки при переточках.

Одним из важных этапов проектирования внутренних протяжек является **проверка канавок на помещаемость снимаемой стружки**. Это объясняется тем, что стружка, образуемая в процессе протягивания, не имеет свободного выхода. Она должна скручиваться в форме валика, диаметр которого приблизительно равен высоте зуба (глубине канавки) h . Отсюда необходимый и достаточный объем канавки определяется из соотношения объемов канавки V_k и стружки $V_{стр}$. Величина этого отношения называется **коэффициентом заполнения канавки**

$$K = V_k / V_{\text{стр}}.$$

Учитывая, что коэффициент усадки стружки по ширине близок к единице, то для упрощения расчетов отношение указанных объемов можно заменить отношением соответствующих площадей. При этом площадь канавки F_k берется не вся, а только ее активная часть, равная площади круга диаметром h , а площадь срезаемой стружки $F_{\text{стр}} = a_z \cdot L_0$, где L_0 – длина обрабатываемого отверстия (рис.3.5). Тогда

$$K = F_k / F_{\text{стр}} = \pi h^2 / 4 a_z L_0. \quad (3.1)$$

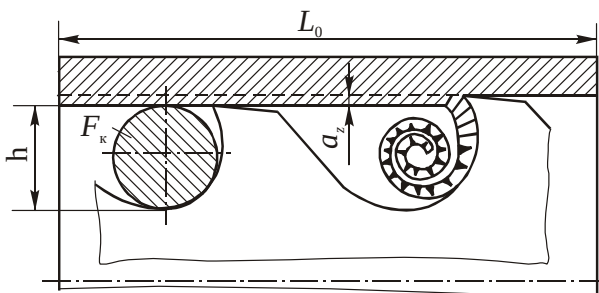


Рис.3.5. Схема заполнения канавки протяжки стружкой

В связи с тем, что срезаемая стружка не может плотно заполнить канавку и между витками могут быть значительные по площади зазоры, допустимое значение K определяется опытным путем. Оно тем больше, чем хуже свертывается стружка, например при обработке легированных сталей, увеличении толщины стружки и т.п. (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1
Значения коэффициентов заполнения канавок K , рекомендуемые для протяжек
одинарного резания

Толщина среза a_z , мм	Обрабатываемый материал				
	Сталь σ_v , МПа			Чугун, бронза, латунь	Медь, алю- миний
	До 400	400...600	Свыше 600		
<0,03	3,0	2,5	3,0	1,5	2,0
0,03...0,07	4,0	3,0	3,5	2,0	3,0
>0,07	4,5	3,5	4,0	2,5	3,5

У протяжек с групповой схемой резания, несмотря на значительное увеличение толщины снимаемой стружки, благодаря отсутствию ребра жесткости и благоприятной форме канавки рекомендуется брать значения $K = 2 \dots 3$ [18].

Из уравнения (3.1) можно определить

$$h \geq 1,13 \sqrt{K a_z L_0} \quad (3.2)$$

или скорректировать величину подъема на зуб, исходя из условия помещаемости стружки для принятого значения глубины канавки (высоты зуба) h :

$$a_z = \pi h^2 / 4 K L_0. \quad (3.3)$$

Длина режущей части протяжки и число одновременно работающих зубьев зависят от принятого шага зубьев и длины протягивания.

Предварительно шаг зубьев определяют по уравнениям:

а) одинарная схема резания

$$t = (1,2 \dots 1,5) \sqrt{L_0}; \quad (3.4)$$

б) групповая схема резания

$$t = (1,45 \dots 1,90) \sqrt{L_0}. \quad (3.5)$$

Затем в дальнейших расчетах шаг t корректируют: а) по принятому из условия помещаемости стружки (3.1) значению h ; б) по числу одновременно работающих зубьев

$$z_p = L_0 / t. \quad (3.6)$$

Как правило, это число получается дробным и его округляют до ближайшего большего целого. Причем во избежание перекоса протяжки в отверстии минимальное значение этого параметра должно быть равно:

а) при одинарной схеме резания $z_p \geq 2$; б) при групповой схеме резания - $z_p \geq 3$.

Полученное значение шага $t = L_0 / z_p$ согласовывают с нормализованным рядом шагов (ГОСТ 20364–74). Во избежание вибраций и появления поперечных рисок на обработанной поверхности из-за резких колебаний силы резания в моменты выхода зубьев из контакта с заготовкой шаг зубьев рекомендуется делать неравномерным с отклонением $\pm 0,5$ мм.

Внутренние протяжки проверяются на прочность из-за возникающих больших растягивающих напряжений

$$\sigma = P_z / F_{\text{оп}} \leq [\sigma], \quad (3.7)$$

где P_z – сила протягивания; $F_{\text{оп}}$ – площадь опасного сечения; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение при растяжении (для цельных протяжек из быстрорежущей стали $[\sigma] = 350 \dots 400$ МПа; для хвостовиков из стали ХВГ и сталей 45, 40Х – $[\sigma] = 250$ МПа).

Опасными у протяжки являются два сечения с минимальными площадями: 1) F_1 – по выточке в хвостовике; 2) F_2 – по сердцевине первой стружечной канавки.

При этом F_1 берется по ГОСТ 4044–70, а F_2 определяется по формуле

$$F_2 = \pi(d_1 - 2h)^2 / 4,$$

где d_1 – диаметр первого зуба протяжки.

При нарушении неравенства (3.7) следует изменить схему резания или уменьшить факторы, определяющие силу протягивания P_z , которая, например, для круглых протяжек с одинарной схемой резания подсчитывается по уравнению

$$P_z = C_p a_z^x \pi d_p K_\gamma K_c K_\kappa, \quad (3.8)$$

где C_p – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала; x – показатель степени при толщине стружки a_z ; πd – ширина срезаемого слоя; z_p – число одновременно работающих зубьев; K_γ, K_c, K_κ – поправочные коэффициенты соответственно на передний угол, смазку и износ.

Числовые значения этих параметров можно найти в [23, 27 и др.].

3.3. Расчет протяжек для обработки круглых отверстий

Расчет начинается с выбора материала режущей части протяжки. Наилучшим материалом являются быстрорежущие стали марок Р6АМ5 и Р12Ф3, а при обработке труднообрабатываемых материалов – Р18, Р6М5К5 и Р9К10. В условиях мелкосерийного и единичного производств применяют более дешевые инструментальные стали типа ХВГ. Для экономии быстрорежущей стали протяжки диаметром 15...40 мм изготавливают сборными со сварными, а диаметром более 40 мм – со

сьемными (на резьбе) хвостовиками из термообработанных сталей 45 или 40Х. Протяжки из стали ХВГ делают цельными.

Размеры конструктивных элементов протяжки назначают в соответствии с рекомендациями для внутренних протяжек, приведенными выше.

Для расчета основной режущей части протяжки необходимо назначать припуск на протягивание с учетом диаметра, длины и требований по точности и шероховатости протянутого отверстия, а также способа обработки отверстия под протягивание.

При одинарной схеме резания припуск (на диаметр) под протягивание назначают либо по экспериментальным данным, либо рассчитывают по следующим эмпирическим уравнениям:

1) для отверстия после сверления

$$A_0 = 0,005d_0 + (0,1...0,2)\sqrt{L_0} + (0,7...1,0)\delta; \quad (3.9)$$

2) после подготовки отверстия зенкерованием, растачиванием и развертыванием

$$A_0 = 0,005d_0 + (0,05...0,1)\sqrt{L_0} + (0,7...1,0)\delta, \quad (3.10)$$

где d_0 – минимальный диаметр обработанного отверстия; L_0 – длина отверстия; δ – допуск на изготовление отверстия.

Назначают припуск на чистовую часть A_q , исходя из требований к отверстию после протягивания. Обычно берут 2...4 чистовых зуба с подъемом $a_z = 0,025...0,005$ мм, уменьшающимся от первого к последнему зубу. Дальнейшее уменьшение a_z нежелательно, так как толщина срезаемого слоя становится сопоставимой с радиусом скругления режущей кромки, полученным при заточке ($\rho_{\min} = 0,002...0,003$ мм). Поэтому при протягивании сталей на режущей кромке может образовываться нарост, вызывающий увеличение шероховатости обработанной поверхности. При затуплении режущей кромки радиус ее скругления увеличивается, что вызывает повышенный нагрев протяжки и появление вибраций.

Число черновых (обдирочных) зубьев определяется из уравнения

$$z_0 = (A_0 - A_q) / 2a_z. \quad (3.11)$$

Предварительно подъем на черновые зубья a_z выбирают в зависимости от обрабатываемого материала по рекомендациям [27].

Диаметр первого зуба принимают обычно равным диаметру подготовленного под протягивание отверстия, т.е. $d_1 = d_0$. Диаметры после-

дующих зубьев рассчитывают, добавляя к предыдущему величину $2a_z$, т.е. $d_2 = d_1 + 2a_z$, $d_3 = d_2 + 2a_z$ и т.д. в пределах припуска на черновые зубья.

Шаг зубьев предварительно определяют по уравнению (3.4), а затем уточняют по условию помещаемости стружки (3.1) и по числу z_p зубьев, одновременно находящихся под стружкой (3.6).

Рассчитывают силу протягивания P_z по уравнению (3.8) и проводят проверку протяжки на прочность по уравнению (3.7).

Диаметры последнего чистового зуба и зубьев калибрующей части протяжки назначают по верхнему предельному размеру обработанного отверстия с учетом разбивки, которая обычно составляет $0,005 \dots 0,010$ мм для толстостенных заготовок. При обработке тонкостенных деталей возможна усадка отверстия, величина которой определяется экспериментально. В этом случае диаметр калибрующей части делают больше на величину усадки. Шаги чистовых и калибрующих зубьев с целью улучшения качества обработанной поверхности назначают так же, как и у черновых, – неравномерными, с колебанием шага t в пределах ± 1 мм. Число калибрующих зубьев принимают равным от 4 до 10 в зависимости от требуемой точности обработки отверстия.

Общая длина протяжки состоит из длины хвостовиков, шейки, направляющих, режущей и калибрующей частей. Длины двух последних частей определяют как произведение чисел соответствующих зубьев на их шаги.

Предельная длина протяжки ограничивается рядом условий: длиной рабочего хода станка, короблением при термообработке, технологическими возможностями инструментального цеха (наличием шахтных печей необходимой глубины, шлифовальных станков с необходимым расстоянием между центрами и др.). Если длина протяжки оказывается больше предельно допустимой, то ее разбивают на 2...3 более короткие протяжки, работающие последовательно одна за другой.

Ориентировочно предельная длина протяжки диаметром меньше 50 мм должна быть не более $(50 \dots 55)d$ и при $d > 50$ мм – не более $30d$.

Особенности расчета протяжек с групповой схемой резания. Методика расчета таких протяжек подробно изложена в [18]. Отметим только ее принципиальные отличия от расчета протяжек с одинарной схемой резания.

1. Между группами (секциями) черновых и чистовых зубьев у этих протяжек предусматриваются две–три двузубые секции переходных зубьев с подъемом, в 2 раза меньшим, чем у черновых. Они позволяют избежать резкого падения силы резания в момент выхода черновых зубьев из отверстия и, кроме того, служат для предварительной зачист-

ки поверхности после обработки ее черновыми зубьями. Диаметры зубьев в секции одинаковые, а широкие выкружки на зубьях выполняются в шахматном порядке.

2. Расчет протяжек начинается с выбора величины подъема на зуб s_{z0} черновых (обдирочных) зубьев, исходя из равенства стойкостей черновой и чистовой частей протяжки при заданной скорости резания. Последняя выбирается по таблицам в зависимости от свойств обрабатываемого и режущего материалов и группы качества обработанного отверстия (сочетания точности и шероховатости поверхности отверстия).

3. Определяется глубина стружечной канавки h из условия помещаемости стружки по уравнению (3.1) при $K = 2 \dots 3$ и по ней же из соответствующей таблицы [18] подбирается значение шага между зубьями. При этом одному значению h соответствует несколько значений t . Там же даны значения остальных параметров зуба и стружечной канавки.

Для протяжек диаметром меньше 40 мм расчетное значение h проверяется на достаточную жесткость протяжки при принятом условии, что

$$h \leq h_{\text{ж}}, \quad (3.12)$$

где $h_{\text{ж}}$ – высота зуба протяжки, имеющей достаточную жесткость ($h_{\text{ж}} = (0,20 \dots 0,23)d$).

Если неравенство (3.12) нарушается, то, приравняв $h = h_{\text{ж}}$ по уравнениям (3.2) и (3.3), делают пересчет с уменьшением величины $s_{z0} = a_z$.

4. Определяют допустимую силу P_z протягивания из трех значений: 1) по тяговому усилию станка $P_{\text{ст}}$; 2) по прочности опасного сечения хвостовика $P_{\text{хв}}$ и 3) по прочности сечения канавки перед передним зубом $P_{\text{оп}}$. В дальнейших расчетах наименьшее из этих значений принимается за $P_{z\text{max}}$ – максимально допустимое, т.е. фактическое значение силы $P_{z\text{ф}}$ должно быть не более допустимого ($P_{z\text{ф}} \leq P_{z\text{max}}$).

5. Рассчитывается число черновых (обдирочных) зубьев в секции

$$z_{c0} = \pi d q_0 z_p K_{\Sigma} / P_{z\text{max}}, \quad (3.13)$$

где q_0 – удельная сила резания, приходящаяся на 1 мм длины режущей кромки (берется из номограмм или таблиц в зависимости от обрабатываемого материала и подачи s_{z0}); z_p – число одновременно работающих зубьев (рассчитывается по уравнению (3.6)); K_{Σ} – суммарное произведение поправочных коэффициентов на измененные условия резания (определяется по данным, сведенным в таблицы [18]).

Полученное дробное значение z_{c0} округляется до ближайшего большего целого, причем $5 \geq z_{c0} \geq 2$. В этом случае фактическая сила протягивания при принятом значении z_{c0} и на основании уравнения (3.13):

$$P_{z\phi} = \pi d q_0 \frac{z_p}{z_{c0}} K_{\Sigma}. \quad (3.14)$$

В этом уравнении отношение z_p / z_{c0} эквивалентно числу полных (без выкружек) зубьев, периметр которых равен πd .

6. Припуск на диаметр протяжки A , определяемый исходными данными, распределяют между черновыми A_0 , переходными A_n и чистовыми $A_{\text{ч}}$ зубьями. Значения A_n и $A_{\text{ч}}$ берут из таблиц [18] в зависимости от требуемого качества обработанного отверстия. Таким образом, припуск на черновые (обдирочные) зубья

$$A_0 = A - (A_n + A_{\text{ч}}).$$

7. Определяют число групп (секций) черновых зубьев

$$i_0 = A_0 / 2s_{z0}.$$

Так как число групп должно быть целым, то полученное значение округляют до ближайшего меньшего целого.

Остаточную часть припуска

$$A_{\text{ост}} = A_0 - 2s_{z0}i_0$$

в зависимости от его величины распределяют между тремя группами зубьев (черновых, переходных и чистовых), добавляя секцию соответствующих зубьев.

8. Число чистовых и калибрующих зубьев и подъемы на чистовые зубья выбирают из таблиц [18] в зависимости от требований к точности и шероховатости обработанного отверстия. Шаги на эти зубья назначают переменными, состоящими из трех значений в зависимости от шага черновых зубьев t_0 , увеличивая или уменьшая шаг t на 0,5...1,0 мм. По наименьшему значению t подбирают профиль зубьев и размеры канавки. Чистовые зубья, подобно переходным зубьям, выполняют в виде двузубых секций.

9. Рассчитывают или назначают по таблице [18] число и размеры выкружек на зубьях.

Задачу проектирования протяжки авторы этой методики рассматривают как многовариантную. Меняя в разных вариантах значения s_{z0} , z_p , z_{c0} , t_0 с пересчетом q_0 по (3.13), за оптимальный принимают вариант, дающий

наименьшую длину режущей части протяжки, большой запас на переточку зубьев и наименьшее число зубьев.

3.4. Особенности расчета протяжек для обработки фасонных отверстий

Протяжки для обработки гранных отверстий. В конструкциях деталей машин часто встречаются сквозные отверстия многогранной формы: треугольные, квадратные, прямоугольные, шестигранные и др., которые обрабатывают гранными протяжками.

Особенности проектирования и расчета гранных протяжек рассмотрим на примере обработки квадратного отверстия. Использование профильной схемы резания здесь нецелесообразно, так как режущие кромки в форме квадрата (рис.3.6, *а*) в местах пересечения боковых сторон имеют задние углы, близкие к нулю. С учетом того, что условия деформирования и отвода срезаемой стружки на этих участках неблагоприятны, это приводит к быстрому износу протяжки по углам.

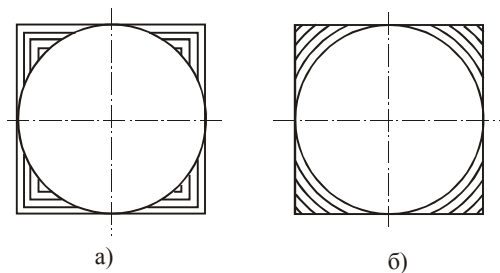


Рис.3.6. Схемы резания, применяемые при протягивании квадратных отверстий: *а* – профильная; *б* – генераторная

При генераторной схеме (рис.3.6, *б*) удастся избежать этих нежелательных явлений, так как в этом случае главные режущие кромки зубьев выполняют по дуге окружности, радиус которой изменяется в зависимости от принятых величин подъема на зуб. Вспомогательные кромки имеют профиль, подобный геометрической форме протягиваемого отверстия.

Оформление главных режущих кромок в виде дуг окружности обеспечивает хорошее центрирование протяжки в отверстии, лучшие условия обработки и отвода стружки. Такие протяжки в изготовлении более

технологичны, так как режущие зубья могут быть шлифованы кругом одного профиля напроход на круглошлифовальных станках.

Обычно гранные протяжки из-за больших длин изготавливают комплектами из двух, трех и более штук.

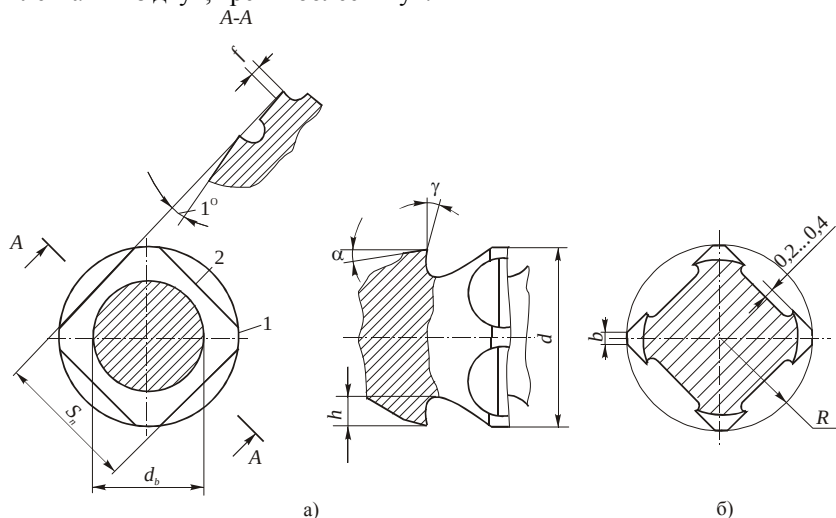


Рис.3.7. Зубья четырехгранной протяжки: *a* – в нормальном и продольном сечениях; *б* – боковые канавки на плоских сторонах зубьев

На рис.3.7, *a* показаны нормальное и продольное сечения протяжки, формы зубьев и канавок, геометрические параметры главных и вспомогательных режущих кромок. С целью уменьшения трения между вспомогательными лезвиями и обработанной поверхностью производится шлифование по плоскости задних поверхностей этих лезвий напроход с поднятием центра задней бабки на угол $\alpha_1 = 1^\circ$ и оставлением ленточки шириной $f = 0,8 \dots 1$ мм. Иногда к концу протяжки впадина канавки посередине вспомогательных лезвий уменьшается до нуля. В этих случаях при ширине грани более 6 мм вышлифовываются продольные канавки глубиной до 0,4 мм (рис.3.7, *б*) на всех режущих и калибрующих зубьях. На главных дуговых режущих кромках при ширине $b > 4$ мм в шахматном порядке наносят одну стружкоделительную канавку, а при $b > 10$ мм – две канавки.

Как видно из рис.3.6, *б* и 3.8, длина главных режущих кромок, определяющая ширину срезаемого слоя, с увеличением диаметра протяжки d_i уменьшается. Суммарная ширина среза на каждом зубе может быть определена для квадратной протяжки по формуле

$$\sum b_i = \pi d_i \left(1 - \frac{\theta_i}{45^\circ}\right),$$

где $\cos \theta_i = S_n / d_i$ (S_n – ширина грани).

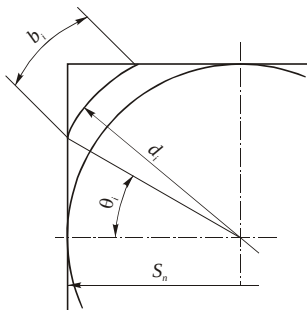


Рис. 3.8. Схема определения длины режущих кромок гранных протяжек

С целью обеспечения постоянства силы протягивания на всем пути прохождения протяжки в отверстии следовало бы равномерно увеличивать подъем на зуб от первого зуба к последнему, что не только обеспечило бы равномерность протягивания, но и, это главное, позволило бы сократить длину протяжки. Однако из-за малых значений подъема на зуб a_z назначать для каждого зуба свою величину – следовательно, намного усложнить технологию изготовления протяжки. Поэтому было предложено [27] разбивать все режущие зубья на 3...4 ступени в зависимости от ширины грани S_n и для каждой ступени назначать свою величину a_{zm} , где m – номер ступени ($S_n \leq 15$ мм – 3 ступени, $S_n < 15$ мм – 4 ступени).

Например, при обработке среднеуглеродистой стали, когда $S_n = 27$ мм, предусмотрены 4 ступени с подъемами на зуб: $a_{z1} = 0,03$ мм; $a_{z2} = 0,05$ мм; $a_{z3} = 0,08$ мм; $a_{z4} = 0,12$ мм. Таким образом, при проектировании гранных протяжек применяется ступенчатая одинарная схема резания, использующая принцип деления припуска по толщине с переменной величиной a_z , увеличивающейся от первой к последней ступени.

На всех ступенях протяжка должна проверяться по уравнению (3.1) на помещаемость стружки. При этом величина K берется переменной, уменьшающейся от первой ступени к последней.

Проверка протяжки на прочность по опасным сечениям выполняется аналогично проверке, принятой для круглых протяжек с одинарной схемой резания. Расчет силы протягивания по уравнению (3.8) выполняется из условия, когда ширина резания максимальна и равна $b = \pi d_1$, где d_1 – диаметр первого зуба, равный диаметру отверстия под протягивание.

Протяжки для обработки шлицевых отверстий. Шлицевые отверстия широко распространены в машиностроении. Они используются для обеспечения подвижных и неподвижных соединений типа «вал – втулка» и передачи больших крутящих моментов. Из-за сложной формы шлицевых отверстий обработка их протягиванием предпочтительнее других способов (долбление, строгание и т.д.), так как обеспечивает более высокие производительность, точность размеров и взаимного расположения поверхностей.

Формы пазов шлицевых отверстий могут быть: а) прямобоочные (рис.3.9, а); б) эвольвентные; в) трапецеидальные; г) елочные (треугольные) и др.

Шлицевые протяжки внешне похожи на шлицевые валы, шлицы которых превращены в режущие зубья путем прорезания стружечных канавок и создания передних и задних углов. Для удаления срезаемого припуска во впадинах шлицев высота зубьев h переменна. При использовании одинарной схемы резания каждый последующий зуб выше предыдущего на величину подъема a_z .

В зависимости от глубины пазов, определяющих толщину срезаемого припуска, шлицевые протяжки изготавливаются комплектами из двух, трех и более штук. При этом условия деформации срезаемого слоя очень тяжелые, так как стружка снимается с нескольких поверхностей пазов. Это также ухудшает ее свертываемость и размещение в стружечных канавках. Из-за большой усадки стружка часто заклинивается в пазах и ухудшает обработанную поверхность.

Из сказанного следует, что при использовании одинарной схемы резания подъемы на зуб должны быть очень малы ($a_z = 0,03...0,06$ мм), а длины режущих частей протяжек – велики.

Рассмотрим особенности конструкций шлицевых протяжек на примере протяжек, применяемых для протягивания прямобоочных шлицевых пазов.

На рис.3.9, а, б показаны шлицевое отверстие и протяжка в сечении, нормальном к ее оси, а на рис.3.9, в, г – распределение припуска при одинарной схеме резания и форма зуба протяжки.

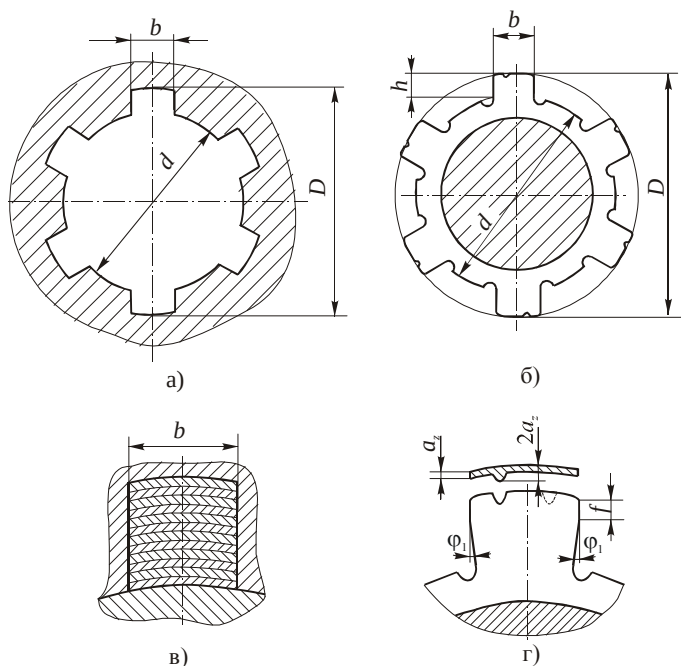


Рис.3.9. Формы шлицевого отверстия и протяжки: а – шлицевое отверстие; б – шлицевая протяжка; в – одинарная схема резания; г – зуб шлицевой протяжки

Отверстие под протягивание получают растачиванием, зенкерованием или развертыванием. Образование пазов по наружному диаметру производится по профильной схеме резания, а по боковым сторонам – по генераторной схеме. При ширине шлицевого паза свыше 6 мм на главных режущих кромках при переходе от одного зуба к другому в шахматном порядке выполняют одну или две стружкоразделительные канавки. В отличие от круглых протяжек, у шлицевых протяжек стружкоразделительные канавки делают на всех режущих и даже на калибрующих зубьях. Для снижения трения шлицевых выступов зубьев протяжки о боковую поверхность пазов выполняется вспомогательный угол в плане на боковых сторонах зуба $\phi_1 = 1^\circ 30' \dots 2^\circ$ с оставлением фаски шириной $f = 0,8 \dots 1,0$ мм для лучшего направления протяжки в отверстии (рис.3.9, г). Это делается в том случае, когда высота зуба больше 1,5 мм. Такой конструкции шлицевой протяжки свойственны те же не-

достатки, что и круглым протяжкам с одинарной схемой резания. В частности, наличие ребра жесткости на срезаемой стружке ухудшает ее свертываемость и не позволяет увеличивать подъем на зуб. Чтобы исправить этот недостаток шлицевых протяжек, была предложена [18] групповая схема резания. Обычно она применяется в том случае, когда число шлицев больше 6...8, длина отверстия $L_0 > 30$ мм, а глубины пазов большие. Такие протяжки изготавливаются диаметром до 450 мм.

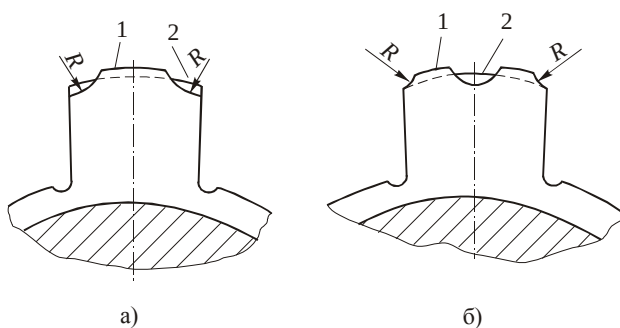


Рис. 3.10. Секция черновых зубьев шлицевой протяжки при групповой схеме резания: а – ширина зубьев $b \leq 18$ мм; б – ширина зубьев $b > 18$ мм (1 – первый зуб секции, 2 – второй зуб секции)

Суть групповой схемы резания заключается в том, что группа или секция состоит из двух зубьев (рис.3.10): первый зуб с выкружками по углам является прорезным, а второй – зачистным. При этом второй зуб делают с занижением по диаметру на величину 0,03...0,04 мм. При ширине зубьев свыше 18 мм на первом зубе делают дополнительную выкружку посередине режущей кромки. Ширина стружки, снимаемая обоими зубьями, делится между ними. Снимаемая первым зубом стружка не имеет ребра жесткости, хорошо скручивается в канавках, не касаясь стенок отверстия. Второй зуб снимает узкие стружки, которые также хорошо скручиваются и легко удаляются из канавок в конце протягивания. Благодаря этому удалось увеличить подъем на черновых зубьях до $a_z = 0,3$ мм и за счет этого значительно сократить длину протяжки. На чистовых зубьях подъем на зуб $a_z = 0,010...0,015$ мм. При этом разделение зубьев на секции не производят.

С целью повышения точности и качества шлицевых отверстий, а также сокращения числа протяжек в комплекте применяют комбинированные протяжки с режущей частью, состоящей из круглых, фасочных и

шлицевых зубьев. Припуск, снимаемый этими зубьями, показан на рис.3.11.

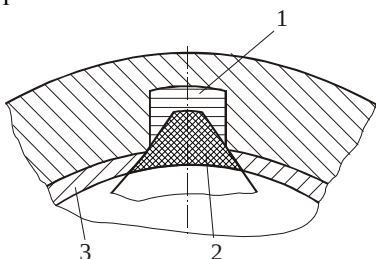


Рис.3.11. Припуск, снимаемый зубьями комбинированной шлицевой протяжки:

1 – шлицевыми; 2 – фасочными;
3 – круглыми

Чаще всего вначале располагают фасочные зубья. Они удаляют значительную часть припуска из шлицевой впадины, формируют фаску у ее основания, предусмотренную чертежом, и выполняют функцию прорезных зубьев перед круглыми зубьями. Последние изготавливают без выкружек, со сплошной режущей кромкой.

Если снимается большой припуск и круглая часть протяжки может иметь большую длину, то для предотвращения возможного поворота заготовки после обработки круглого отверстия фасочные зубья лучше располагать между круглыми и шлицевыми. Этим обеспечивается точность расположения фасок относительно шлицевых пазов. Круглую часть в этом случае можно выполнить аналогичной протяжкам с групповой схемой резания.

При больших размерах шлицевых пазов (по высоте и длине) и неизбежной при этом работе комплектами протяжек (рис.3.12) могут применяться схемы распределения припуска между отдельными протяжками комплекта из трех и двух протяжек (допуск на ширину паза менее 0,05 мм) и двух протяжек (допуск больше 0,04...0,06 мм). Окончательная ширина паза обеспечивается последней протяжкой комплекта, а предыдущие протяжки для снижения сил трения и облегчения работы делаются по ширине зуба зауженными. При этом можно увеличить подъем на черновых зубьях до $a_z = 0,12...0,30$ мм.

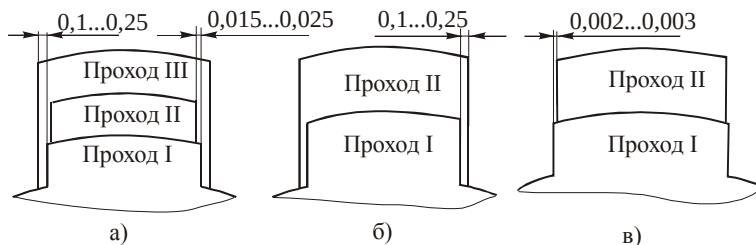


Рис.3.12. Распределение припуска между шлицевыми протяжками комплекта из: а – трех протяжек; б – двух протяжек; в – двух протяжек ($\Delta b > 0,06$ мм)

3.5. Особенности конструкций протяжек для обработки наружных поверхностей

Наружным протягиванием обрабатывают различные поверхности с незамкнутым, открытым контуром: плоскости, уступы, пазы, вогнутые и выпуклые цилиндрические и сложные фасонные поверхности, например впадины зубчатых колес и т.п. В соответствии с этим существует большое разнообразие конструкций наружных протяжек.

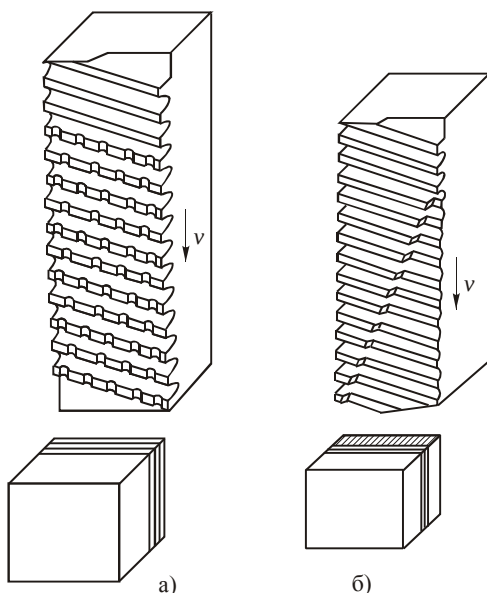


Рис.3.13. Схемы резания, применяемые при протягивании наружных поверхностей: а – профильная; б – генераторная с чистовыми зубьями, выполненными по профильной схеме

В отличие от внутренних, наружные протяжки, как правило, не имеют хвостовиков и направляющих, а имеют только режущие и калибрующие зубья. Открытые обрабатываемые поверхности позволяют назначать размеры конструктивных элементов и площади сечения тела протяжки с большим запасом. Поэтому наружные протяжки на прочность обычно не проверяются. Условия для схода стружки при этом более благоприятны и проверку на помещаемость стружки в канавки выполняют только при протягивании узких пазов.

К особенностям наружных протяжек относится возможность назначать намного большие, близкие к оптимальным, задние

углы ($\alpha=8\ldots10^\circ$), так как размер протяжки по высоте при переточке не зависит от размера детали. Он может регулироваться с помощью клиньев, винтов и подкладок. Благодаря этому суммарная стойкость наружных протяжек значительно больше стойкости внутренних протяжек.

Протягивание может производиться либо без предварительной обработки заготовок, полученных литьем, ковкой или штамповкой со сня-

тием припусков величиной не менее 5...6 мм, либо после строгания или фрезерования.

При наружном протягивании используются те же схемы резания, что и при внутреннем протягивании. На рис.3.13 показаны профильная и генераторная схемы резания, применяемые при обработке плоскостей. Для снижения шероховатости поверхностей последние зубья протяжки (рис.3.13, б) выполнены по профильной схеме резания.

По способу деления срезаемого слоя по толщине чаще всего используется одинарная схема резания.

При протягивании широких плоских поверхностей и срезании больших припусков предложена разновидность групповой схемы резания – **трапецидальная схема** (рис.3.14), при которой припуск срезается последовательно двумя секциями (группами) зубьев, имеющих подъем на каждый зуб. Зубья первой секции вырезают узкие трапецидальные пазы, а зубья второй секции, имеющие прямолинейные режущие кромки, срезают оставшиеся выступы. В конце последней секции предусмотрены чистовые зубья с уменьшенным подъемом на зуб. На черновых же зубьях такая схема деления припуска позволяет устанавливать большие объемы на зуб и производить протягивание – без предварительной обработки поверхности и даже при наличии «корки».

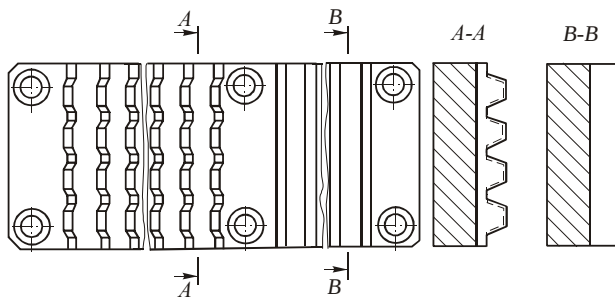


Рис.3.14. Плоская протяжка с трапецидальной схемой резания

Трапецевидные зубья первой секции изготавливают фрезерованием и шлифованием напроход с поднятием на 1,0...1,1 мм задней части протяжки для образования задних углов на вспомогательных кромках. Благодаря этому такие протяжки просты в изготовлении, имеют большой запас на переточку, большую стойкость и меньшую длину.

Заточка зубьев протяжек при прямолинейной форме режущих кромок может проводиться как по задней, так и по передней поверхности, а

при фасонной форме режущих кромок – только по передней поверхности.

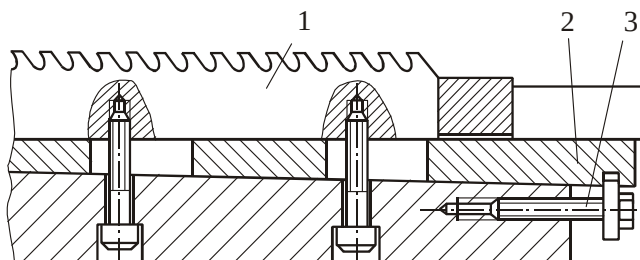


Рис.3.15. Регулирование по высоте секции сборной наружной протяжки с помощью клина: 1 – секция протяжки; 2 – клин; 3 – регулировочный винт

По конструкции наружные протяжки могут быть цельными или сборными, состоящими из нескольких секций сравнительно небольшой длины (до 300 мм). Секции крепятся к корпусу винтами сверху, снизу или сбоку с использованием клиньев и планок (рис.3.15, 3.16). Крепление винтами снизу более компактное и простое. Однако при переточке и настройке таких секций приходится снимать корпус всей протяжки со станка. Этого можно избежать путем крепления секций винтами сверху.

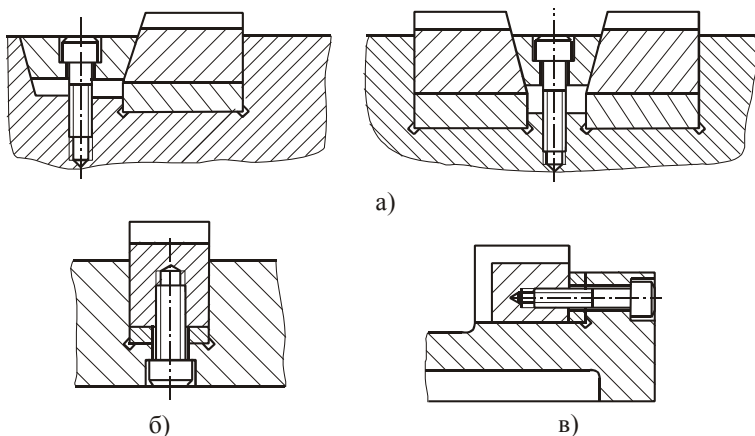


Рис.3.16. Типовые способы крепления секции к корпусу наружной протяжки: а – винтом и клином сверху; б – винтом снизу; в – винтом сбоку

При протягивании длинных поверхностей для обеспечения непрерывного удаления стружки из зоны резания у наружных протяжек зубья делают наклонными (рис.3.17) с углом $\beta = 70 \dots 80^\circ$. При этом обеспечивается равномерная работа протяжки.

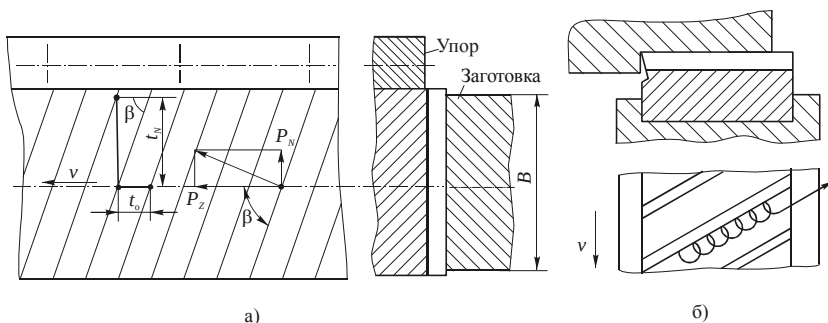


Рис.3.17. Схема обработки заготовки наружной протяжки: а – наклонное расположение зубьев; б – направление схода стружки

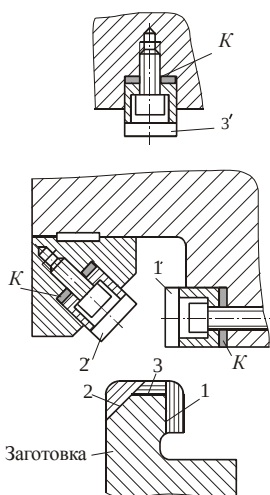


Рис. 3.18. Протягивание пересекающихся поверхностей наружной протяжкой

Полная, как у цилиндрических фрез, равномерность процесса протягивания может быть обеспечена в случае, если выдержаны соотношения

$$C = B/t_N, \quad t_N = t_0 \operatorname{tg} \beta,$$

где C – целое число; B – ширина протягивания; t_N , t_0 – шаги зубьев соответственно в нормальном и осевом сечениях.

У протяжек с наклонными зубьями возникает боковая составляющая силы резания P_N – нормальная к направлению протягивания, для восприятия которой, а также главной составляющей P_Z в корпусе протяжки, закрепляемой на каретке станка, предусматриваются пазы или упорные планки.

При обработке сложных пересекающихся поверхностей заготовок с помощью секций сборных протяжек прибегают к разделному протягиванию отдельных участков профиля. Так, на рис.3.18 поверхности заготовки 1, 2, 3 обрабатываются отдельными, соответственно 1', 2', 3', секциями, закреп-

появляющимися на корпусе протяжки. При настройке они могут регулироваться по высоте с помощью подкладок или клиньев K .

На прочность секции протяжек не проверяют, так как они работают в основном на сжатие.

3.6. Использование твердых сплавов для оснащения протяжек

Условия работы зубьев протяжек неблагоприятны для оснащения их твердыми сплавами, так как они снимают тонкие и широкие стружки и работают при низких скоростях резания. Это вызывает колебание силы протягивания и может привести к разрушению твердого сплава. Кроме того, применение твердых сплавов значительно повышает стоимость протяжек и ограничивается сложностью их изготовления. В то же время использование твердых сплавов позволяет в несколько раз повысить стойкость протяжек, особенно при обработке чугунов, высоколегированных сталей и сплавов, а также точность и качество обработанной поверхности.

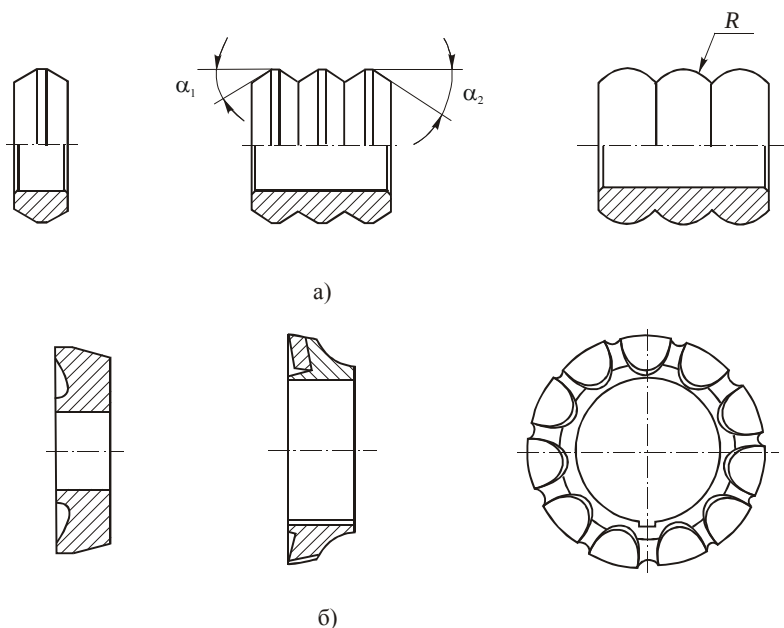


Рис.3.19. Выглаживающие и режущие твердосплавные зубья внутренних протяжек:
 a – выглаживающие кольца и блоки; b – режущие цельные и напайные
 твердосплавные кольца

Твердыми сплавами оснащают в первую очередь наиболее простые по конструкции внутренние протяжки (шпоночные, шлицевые, круглые) и секции (плоские, пазовые, фасонные и др.) наружных протяжек.

В конструкциях внутренних протяжек в последнее время широкое применение нашло использование твердого сплава для выравнивания (пластического деформирования) микронеровностей обработанной поверхности. В этих случаях применяют комбинированные режущее-выглаживающие протяжки, у которых после калибрующих зубьев устанавливают выглаживающие зубья из твердого сплава в виде колец или блоков. Выглаживающие зубья по форме двухсторонние конические с цилиндрическим пояском посередине или сферические (рис.3.19, *а*). Число таких зубьев берется в пределах от 2 до 5 в зависимости от требуемых точности и шероховатости обработанного отверстия. Припуск на диаметр, т.е. общий натяг на зубья, небольшой и равен 0,03...0,20 мм. Он распределяется между зубьями равномерно с уменьшением к концу протяжки. Диаметр последнего выглаживающего зуба принимается равным максимально возможному размеру обработанного отверстия.

При обработке стальных заготовок применение выглаживающих зубьев позволяет достигать точности $IT\ 6...IT9$ и шероховатости поверхности $Ra\ 0,16...0,63\ \mu\text{м}$.

Для обработки заготовок типа втулок используют твердосплавные деформирующие протяжки – **дорны**. Они состоят из рабочих элементов в форме колец, которые крепятся на цилиндрическом стальном стержне. Радиальная поверхность кольца представляет два усеченных конуса с цилиндрическим пояском посередине, подобно выглаживающим кольцам (рис.3.19, *а*). Число колец от 4 до 10 с большими натягами, достигающими 1 мм на каждое кольцо. Такие протяжки позволяют не только повысить точность отверстий, но и увеличить их диаметр до требуемой величины без снятия стружки. Шероховатость обработанной поверхности при этом достигает $Ra\ 0,16...0,08\ \mu\text{м}$.

Твердые сплавы в качестве режущих элементов с целью повышения производительности и стойкости при обработке чугунов и труднообрабатываемых сталей используются у внутренних протяжек в виде цельных колец или с напайными пластинами (рис.3.19, *б*). Кольца устанавливаются на стальной державке протяжки и закрепляются гайками. При этом сменные кольца смещают относительно друг друга путем поворота вокруг оси таким образом, чтобы промежутки между пластинами играли роль стружкоделительных канавок.

Условия работы твердосплавных режущих элементов у протяжек для обработки наружных поверхностей по сравнению с внутренними протяжками более благоприятны как с точки зрения степени деформирования срезаемого слоя, так и свободного удаления стружки из зоны резания. В конструкциях сборных протяжек можно применять распределение припуска по секциям с учетом более высокой надежности работы твердосплавных режущих зубьев и благоприятных условий их переточки и замены при выкрашивании режущих кромок.

В зависимости от способа соединения режущей твердосплавной части с корпусом различают два вида: разъемное и неразъемное.

Неразъемное соединение корпуса с пластинами твердого сплава осуществляется посредством пайки (рис.3.20, *а*). Его достоинством является простота конструкции. Недостатки: невозможность замены пластинок при выкрашивании и поломке; ухудшение условий заполнения впадины зуба стружкой после переточек; наличие остаточных напряжений в пластинах при пайке.

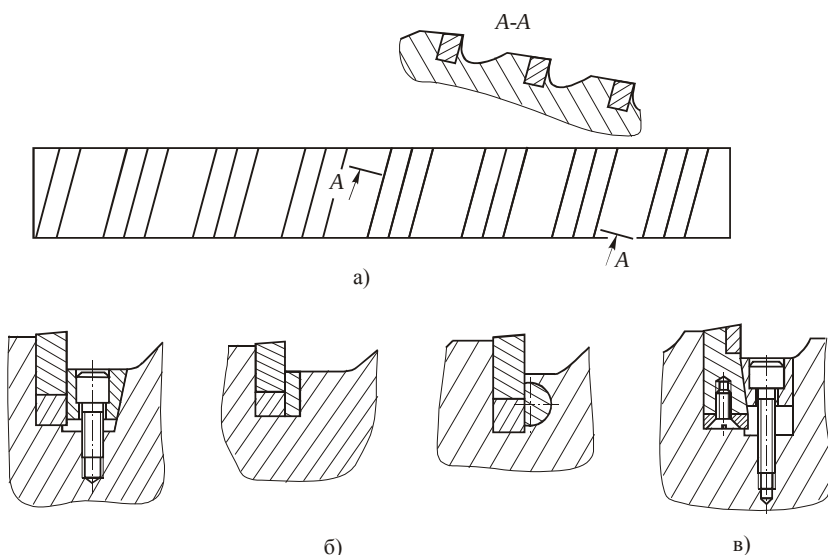


Рис. 3.20. Режущие твердосплавные зубья наружных протяжек: *а* – протяжка с напайными твердосплавными пластинами; *б* – механическое крепление твердосплавных пластин клином и штифтом; *в* – механическое крепление ножей с твердосплавными пластинами

Устранение этих недостатков достигается путем осуществления разъемного соединения пластин твердого сплава с корпусом, т.е. механическим креплением пластин с помощью винтов, штифтов, клиньев и т.п. Из множества вариантов такого крепления твердосплавных пластин с корпусом протяжки можно отметить как наиболее удачные крепления клиньями или штифтами с лысками (рис.3.20, б), обеспечивающие хорошие условия для размещения стружки в канавке, возможность регулирования по высоте зубьев с помощью подкладок и надежное крепление пластин. При этом исключаются внутренние напряжения в пластинах, характерные для напайных пластин.

Хорошие условия для регулирования и замены режущих зубьев имеет конструкция протяжки со вставными ножами, показанная на рис.3.20, в, которая обеспечивает возможность 1) раздельного затачивания ножей с последующей точной сборкой; 2) быстрой замены ножей без снятия протяжки со станка; 3) крепления твердосплавных пластин на ножах способами пайки или механического крепления; 4) регулирования размеров зубьев по высоте вне станка.

При этом из-за необходимости размещения элементов крепления несколько увеличиваются размеры протяжки.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные типы протяжек, их достоинства и недостатки.
2. Почему протяжки обеспечивают высокую производительность при сравнительно низких скоростях резания?
3. Схемы удаления припуска при работе внутренних протяжек. Их достоинства и недостатки.
4. На что и как проверяют внутренние протяжки при проектировании?
5. В чем особенности расчета протяжек при групповой схеме резания?
6. Особенности работы и схемы резания при протягивании гранных отверстий.
7. Схемы резания при протягивании шлицевых отверстий.
8. Особенности конструкций и методики расчета протяжек для обработки наружных поверхностей.
9. Когда и каким образом можно использовать твердые сплавы для оснащения протяжек?

4. СВЕРЛА

Сверла – это осевые режущие инструменты, предназначенные для образования отверстий в сплошном материале, а также для обработки (рассверливания) отверстий, предварительно изготовленных ковкой, штамповкой, литьем или сверлением. Они широко применяются в машиностроении, занимая по этому признаку второе место после резцов.

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 отличаются большим разнообразием, которое можно свести к следующим основным типам: 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 твердыми сплавами.

4.1. Перовые сверла

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. Современные конструкции перовых сверл показаны на рис. 4.1, *а*, *б*, *в*.

Цельные перовые сверла (рис. 4.1, *а*) изготавливают из прутка путемковки или фрезерования режущей части в форме пластины, которая затачивается на конус под углом $2\varphi = 118^\circ$. 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.

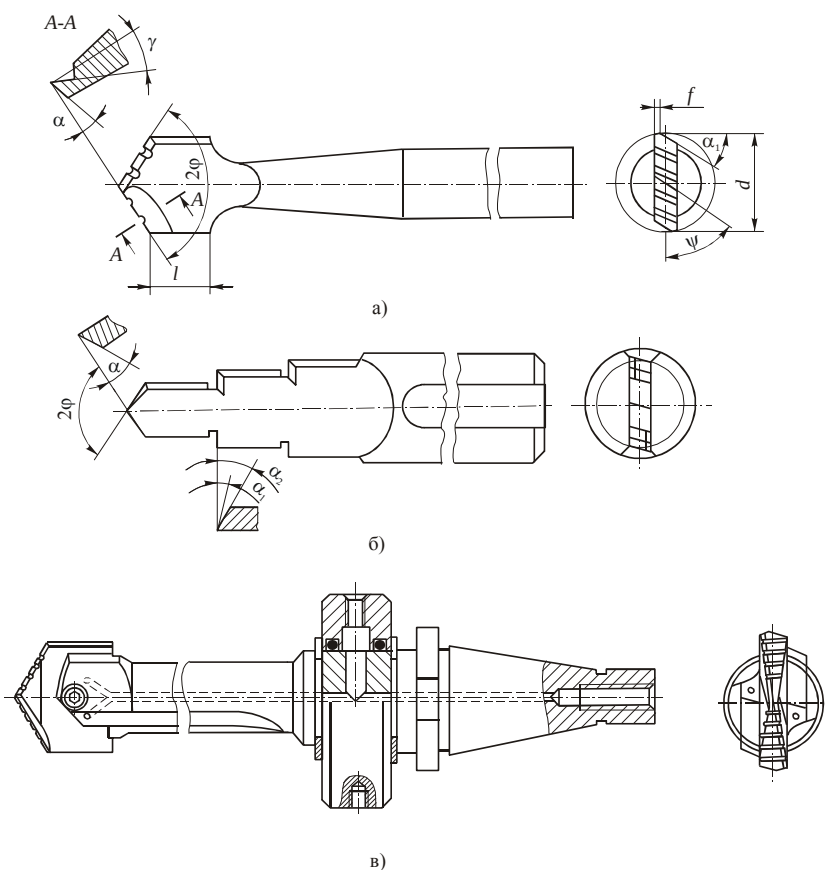


Рис. 4.1. Перовые сверла: а – цельное; б – для сверления ступенчатых отверстий; в – сборное, с внутренним напорным охлаждением

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 $\alpha_1 = 5 \dots 8^\circ$ с оставлением узких цилиндрических фасок шириной $f = 0,2 \dots 0,5$ мм по всей длине режущей части, которые обеспечивают лучшее направление сверла в отверстии.

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 необходимостью периодического вывода сверла из отверстия для освобождения от стружки.

Примеры совершенствования конструкций перовых сверл показаны на рис. 4.1, б и в. Первая из них применяется для сверления неглубоких ступенчатых отверстий на станках-автоматах. Она позволяет сократить число операций и, следовательно, инструментов. Вторая конструкция представляет собой сборное перовое сверло с режущей сменной 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.

4.2. Спиральные сверла

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.

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 большей 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.

Основные конструктивные элементы и геометрические параметры спиральных сверл показаны на рис. 4.2. 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 располагается на сердцевине сверла с условным диаметром $d_0 = (0,15 \dots 0,25)d$, где d – диаметр сверла. Две вспомогательные режущие кромки лежат на пересечении передних поверхностей и цилиндрических калибрующих ленточек, направляющих сверло в отверстии и образующих калибрующую часть сверла. Угол наклона вспомогательных кромок к оси сверла ω определяет в основном величину передних углов γ на главных режущих кромках, которые, как будет показано ниже, переменны по величине в разных точках этих кромок.

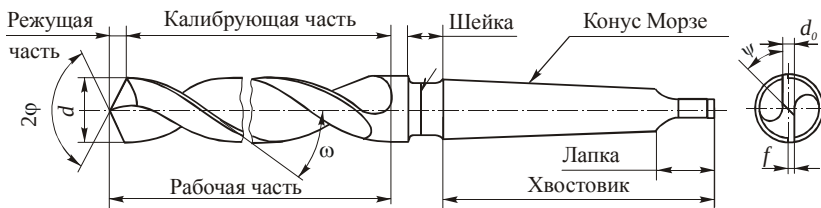


Рис. 4.2. Спиральное сверло

Для снижения трения калибрующих ленточек о стенки отверстия их ширину в зависимости от диаметра сверла принимают равной $f = (0,32 \dots 0,45)\sqrt{d}$, а высоту $\Delta = 0,1 \dots 0,3$ мм. Во избежание защемления сверла в отверстии предусматривается уменьшение его диаметра к хвостовику – обратная конусность, равная $0,03 \dots 0,12$ 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.

Режущая и калибрующая части сверла составляют его рабочую часть, по длине которой сверла делятся на короткую, среднюю и длинную серии. Стандартные спиральные сверла изготавливают диаметром 0,1...80 мм с допусками по $h8...h9$. За рабочей частью сверла следует шейка, которая используется для нанесения маркировки сверла: диаметра, материала режущей части, товарного знака завода-изготовителя.

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.

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. У стандартных сверл $2\varphi = 116...120^\circ$. При этом главные режущие кромки строго прямолинейны и совпадают с линейчатой образующей винтовой передней поверхности. При заточке сверл угол заточки ($2\varphi_{\text{зат}} \neq 2\varphi$) 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 $2\varphi = 116...120^\circ$, нержавеющей и высокопрочных сталей $2\varphi = 125...150^\circ$, чугуна, бронзы $2\varphi = 90...100^\circ$, чугуна высокой твердости $2\varphi = 120...125^\circ$, цветных металлов (алюминиевые сплавы, латунь, медь) $2\varphi = 125...140^\circ$.

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: $\omega = 25 \dots 28^\circ$ для $d < 10$ мм и $\omega = 28 \dots 32^\circ$ 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 $40 \dots 60^\circ$. 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 $25 \dots 35^\circ$, чугунов и других хрупких материалов – $10 \dots 15^\circ$, алюминия, меди и других вязких легкообрабатываемых материалов – $35 \dots 45^\circ$.

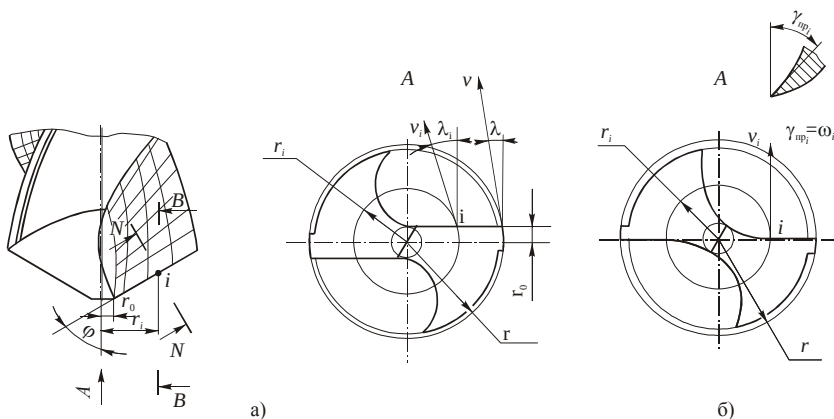


Рис. 4.3. Геометрические параметры передней поверхности спирального сверла: а – стандартное сверло; б – сверло с режущими кромками, расположенными в осевой плоскости

Передний угол γ спиральных сверл имеет переменное значение по длине главных режущих кромок. Это объясняется тем, что передняя поверхность сверла является винтовой линейчатой конволютной, так как она образуется винтовым движением отрезка прямой, наклоненной к оси инструмента (рис. 4.3, а). У стандартных сверл с прямолинейными

режущими кромками образующая поверхности совпадает с режущей кромкой и составляет угол φ с осью сверла. При ее винтовом движении траектории каждой точки режущей кромки представляют собой винтовые линии с одним и тем же шагом P , который можно измерить на наружном диаметре сверла:

$$P = \pi d / \operatorname{tg} \omega .$$

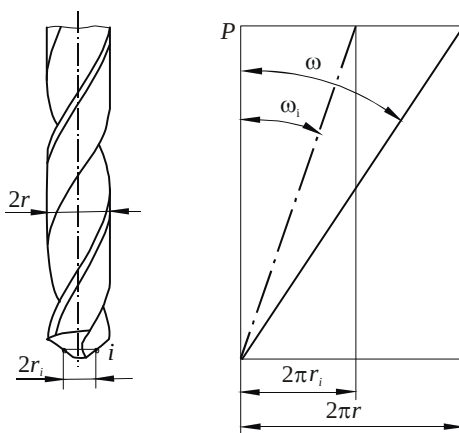
Если через любые точки режущей кромки провести цилиндрические сечения, соосные со сверлом, и винтовые линии на этих цилиндрах развернуть на плоскость (рис. 4.4), то можно найти угол их наклона к оси сверла. Так как все точки принадлежат одной поверхности, то шаг винтовых линий будет постоянным:

$$P = \frac{2\pi r}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{2\pi r_i}{\operatorname{tg} \omega_i} .$$

Отсюда для любой i -й точки режущей кромки угол наклона винтовой линии к оси сверла

$$\operatorname{tg} \omega_i = \frac{r_i}{r} \operatorname{tg} \omega . \quad (4.1)$$

Рис. 4.4. Изменение угла наклона винтовой линии спирального сверла в цилиндрическом сечении



Определение передних углов на главных режущих кромках рассмотрим на примере двух типов сверл: 1) стандартных – с режущими кромками, расположенными с превышением над осевой плоскостью симметрии на величину r_0 , равную половине диаметра сердцевины (рис. 4.3, а); 2) с режущими кромками, расположенными в осевой плос-

кости (рис. 4.3, б) (такие сверла некоторые зарубежные фирмы применяют для сверления аустенитных сталей).

У сверл второго типа поверхность резания (без учета движения подачи) представляет собой конус, а основная плоскость, проходящая через режущую кромку и нормаль к вектору скорости резания, совпадает с осевой плоскостью. Передний угол $\gamma_{\text{пр}i}$ в продольном сечении $B - B$, параллельном оси сверла и проходящем через любую i -ю точку, будет равен углу наклона винтовой линии ω_i , т.е.

$$\text{tg } \gamma_{\text{пр}i} = \text{tg } \omega_i = \frac{r_i}{r} \text{tg } \omega.$$

С точки зрения процесса резания степень деформирования металла при переходе в стружку определяется углами γ_{N_i} в сечении, нормальном к режущей кромке, поэтому, пользуясь формулой пересчета углов в сечениях от $B-B$ к $N-N$, найдем, что

$$\text{tg } \gamma_{N_i} = \frac{\text{tg } \gamma_{\text{пр}i}}{\sin \varphi} = \frac{r_i}{r} \frac{\text{tg } \omega}{\sin \varphi}. \quad (4.2)$$

На рис. 4.5 для случая $\omega = 30^\circ$, $2\varphi = 120^\circ$ (кривая 1) приведена картина изменения передних углов по длине режущей кромки, рассчитанных по уравнению (4.2).

Вывод уравнения для расчета передних углов у стандартных спиральных сверл существенно усложняется ввиду следующих обстоятельств:

- из-за превышения режущих кромок сверла над осевой плоскостью поверхность резания не коническая, так как режущие кромки не пересекаются с осью вращения в пространстве, а образуют поверхность однополостного гиперболоида;

- векторы скорости резания $\bar{v}_i$ в разных точках режущей кромки r_i имеют разный угол β_i наклона к нормали, проведенной к кромке (рис. 4.5, б). Известно, что основная плоскость, от которой отсчитывают передние углы, проходит через режущую кромку и нормаль к вектору скорости резания, поэтому ее положение в каждой точке переменное и отклоняется от плоскости, параллельной оси сверла на угол η_i по часовой стрелке по мере приближения i -й точки к этой оси (рис. 4.5, в). При этом угол $\gamma_{N_i}^*$ уменьшается на угол η_i , т. е. фактическое значение переднего угла

$$\gamma_{N_i} = \gamma_{N_i}^* - \eta_i, \quad (4.3)$$

где $\gamma_{N_i}^*$ - передний угол, отсчитываемый от плоскости, параллельной оси сверла; η_i - угол поворота координатных плоскостей (основной и резания).

Выводы уравнений для расчета углов $\gamma_{N_i}^*$ и η_i из-за громоздкости здесь не приводятся. В конечном виде уравнение для расчета передних углов γ_{N_i} можно представить следующим образом:

$$\gamma_{N_i} = \arctg \left(\frac{\operatorname{tg} \omega \sqrt{(r_i/r)^2 - c^2}}{\sin \varphi - c \operatorname{tg} \omega \cos \varphi} \right) - \arctg \frac{c \cos \varphi}{\sqrt{(r_i/r)^2 - c^2}}, \quad (4.4)$$

где c - коэффициент радиуса сердцевины ($c = r_0/r$, для стандартных сверл $c = 0,15 \dots 0,25$).

Первый член уравнения (4.4) равен углу $\gamma_{N_i}^*$, а второй - углу η_i .

Несмотря на кажущуюся сложность уравнения (4.4), расчет угла γ_{N_i} можно существенно упростить, если подставить численные значения постоянных параметров, принятых при проектировании конкретно взятого сверла. Например, если у стандартного сверла $\omega = 30^\circ$, $\varphi = 60^\circ$ и $c = 0,16$, то уравнение (4.4) упрощается до следующего вида:

$$\gamma_{N_i} = \arctg \left(0,7 \sqrt{(r_i/r)^2 - 0,0256} \right) - \arctg \left(\frac{0,08}{\sqrt{(r_i/r)^2 - 0,0256}} \right). \quad (4.5)$$

Картина распределения значений угла γ_{N_i} , рассчитанная по уравнению (4.5), представлена кривой 2 на рис. 4.5, а. В отличие от сверл первого типа, у сверл, имеющих превышение режущих кромок над осевой плоскостью инструмента, во всех точках главных режущих кромок имеет место уменьшение величин передних углов. При этом начиная с $r_i/r < 0,37$, на участке, прилегающем к поперечной кромке, передние углы становятся меньше нуля, достигая больших отрицательных значений около сердцевины, что является существенным недостатком геометрии стандартных спиральных сверл.

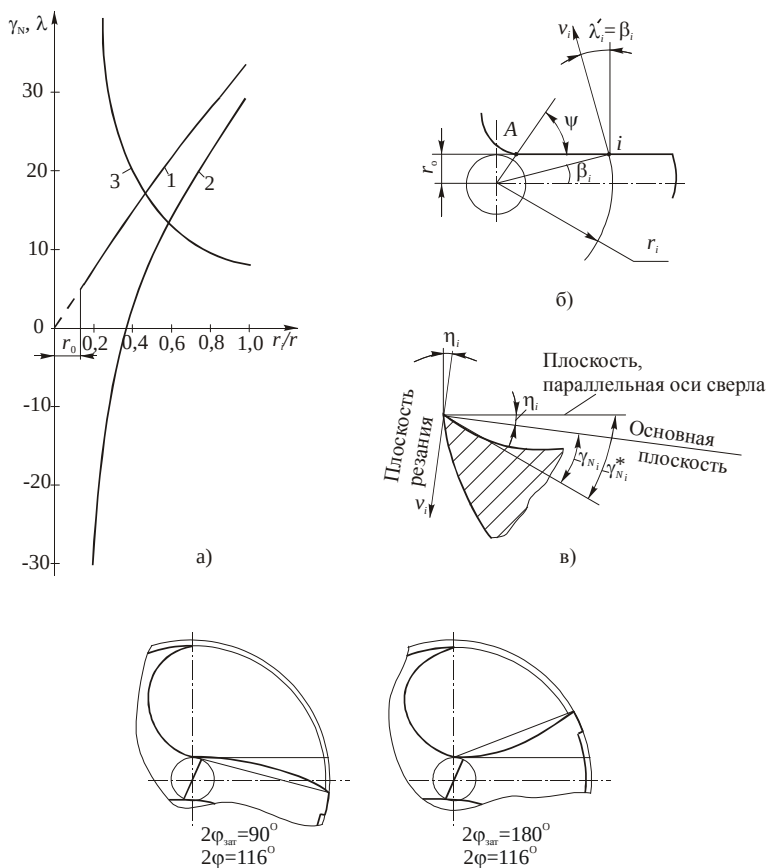


Рис. 4.5. Распределение передних углов γ_{N_i} и угла наклона λ_i по длине главных режущих кромок спирального сверла: а – 1 – γ_{N_i} у сверл с режущими кромками, расположенными в осевой плоскости, 2 и 3 – соответственно γ_{N_i} и λ_i у стандартных сверл; б – поворот вектора скорости резания $\vec{v}_i$ в разных точках режущей кромки; в – определение фактического значения угла γ_{N_i} с учетом угла поворота η_i координатных плоскостей; г – изменение формы главной режущей кромки спирального сверла при заточке, когда $2\varphi_{\text{зат}} \neq 2\varphi$

Минимальное значение r_i/r зависит от угла наклона поперечной режущей кромки ψ . Из рис. 4.5, б следует, что для точки А, где заканчивается передняя поверхность,

$$r_i = r_0 / \sin \psi.$$

Так как $r_0 = cr$, то $r_i = cr / \sin \psi_i$, отсюда

$$(r_i / r)_{\min} = c / \sin \psi.$$

При $\psi = 50 \dots 55^\circ$ и $c = 0,15 \dots 0,25$ отношение $r_i / r = 0,2 \dots 0,195$. Соответственно в точке А передний угол $\gamma_{NA} = -21^\circ 50' \dots -31^\circ 10'$.

Уравнения (4.2) и (4.4) получены [19] при условиях, что главные режущие кромки прямолинейны, а влияние подачи s отсутствует. Последнее условие принято в связи с тем, что влияние подачи на величину угла γ_{Ni} ничтожно мало. Было доказано, что если заточкой изменить угол при вершине таким образом, что $2\varphi_{\text{зат}} < 2\varphi$, то главная режущая кромка в сечении, проходящем через режущую кромку перпендикулярно осевой плоскости, становится выпуклой, а при $2\varphi_{\text{зат}} > 2\varphi$ - вогнутой (рис. 4.5, в). Вывод уравнения для расчета угла γ_{Ni} в этом случае еще больше усложняется. Анализ этого уравнения показал, что при $\varphi_{\text{зат}} < \varphi$ передние углы γ_{Ni} на периферийном участке существенно уменьшаются, что, например, благоприятно отражается на стойкости сверл при использовании метода двойной заточки сверл, когда на периферийном участке режущих кромок $\varphi_{\text{зат}} < \varphi$.

Следует отметить, что в технической литературе из-за неправильного толкования уравнения (4.2) часто ошибочно указывают на увеличение угла γ_{Ni} при уменьшении угла $\varphi_{\text{зат}}$.

Угол наклона главной режущей кромки λ_i . У стандартных сверл с превышением главных режущих кромок над осевой плоскостью симметрии из-за поворота вектора скорости резания в каждой точке режущих кромок образуется угол наклона λ_i . Это угол между вектором скорости и нормалью к режущей кромке. Как видно из рис. 4.5, б угол λ_i является переменным. Из рис. 4.5, б также следует, что проекция этого угла на плоскость, перпендикулярную оси сверла, $\lambda'_i = \beta_i$. Тогда

$$\sin \lambda'_i = \sin \beta_i = r_0 / r_i.$$

При пересчете на плоскость, проходящую через главную режущую кромку, т.е. с учетом угла φ , найдем, что

$$\sin \lambda_i = \frac{r_0}{r_i} \sin \varphi. \quad (4.6)$$

Картина изменения λ_i по длине главной режущей кромки, рассчитанная по уравнению (4.6) при $r_0 = 0,16d$, $\varphi = 60^\circ$, представлена на рис. 4.5, а (кривая 3). Из нее следует, что наибольшие значения λ_i находятся на участке главной режущей кромки, примыкающем к сердцевине сверла.

Как показали исследования процесса сверления, большие значения угла λ_i способствуют снижению степени деформации срезаемого металла, а также улучшают отвод стружки от центра сверла.

Задний угол α на главных режущих кромках создается путем заточки перьев сверл по задним поверхностям, которые могут быть оформлены как части плоской, конической или винтовой поверхностей.

У спиральных сверл принято измерять задний угол в цилиндрическом сечении, соосном со сверлом, как угол зазора между касательной к задней поверхности и поверхностью резания. За последнюю, с определенной степенью приближения, принимают в статике плоскость, проходящую через главную режущую кромку перпендикулярно к осевой плоскости сверла, т.е. без учета угла поворота координатных плоскостей на угол η_i . На практике контроль заднего угла α производится с помощью инструментального микроскопа в точке С, лежащей на наружном диаметре, т.е. на ленточке (рис. 4.6, а).

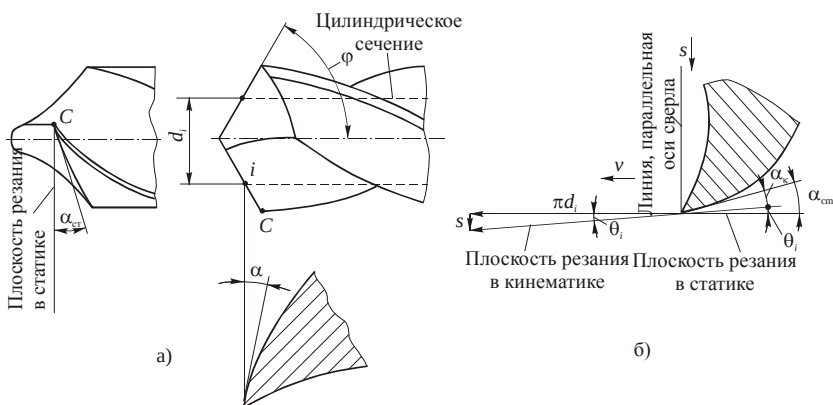


Рис. 4.6. Задние углы в статике $\alpha_{ст}$ и кинематике $\alpha_{к}$ спирального сверла в цилиндрическом сечении

Картина изменения задних углов по длине главных режущих кромок определяется способами заточки, которые должны обеспечить некоторое увеличение α_i с приближением i -й точки к оси сверла. Такое требование объясняется влиянием подачи S на величину кинематического заднего угла α_k , которое становится более заметным в точках режущих кромок, расположенных ближе к сердцевине.

Из рис. 4.6, б следует, что угол α_k – это угол между продолжением развертки винтовой линии траектории движения точки режущей кромки и касательной к задней поверхности сверла. При этом

$$\alpha_{k_i} = \alpha_{ст_i} - \theta_i, \quad (4.7)$$

где $\alpha_{ст_i}$ – задний угол, измеренный в статическом состоянии от плоскости, перпендикулярной к осевой плоскости; θ_i – угол подъема винтовой линии i -й точки режущей кромки, зависящий от диаметра цилиндра, проходящего через i -ю точку и подачи сверла s , мм/об.

Из рис. 4.6, а следует, что

$$\operatorname{tg} \theta_i = s / \pi d_i. \quad (4.8)$$

Для представления о степени влияния подачи s и диаметра сверла d на задний угол α_{k_i} в табл. 4.1 приведены примеры расчета угла θ_i для двух значений диаметра сверла и рекомендуемых максимальных значений подачи для случая сверления стали.

Таблица 4.1

Влияние диаметра спирального сверла и подачи на угол θ_i

Диаметр сверла d , мм	Подача s , мм/об	Угол θ_i	
		На наружном диаметре	У сердцевины
5	0,2	44'	4°18'
50	0,8	18'	2°19'

Из табл. 4.1 следует, что даже при малых значениях диаметров сверла и больших подачах влияние подачи на угол α_k невелико, хотя и заметно в точках, прилегающих к сердцевине сверла. Обычно оно в значительной степени перекрывается методами заточки, обеспечивающими на ленточках угол $\alpha_{ст} = 8 \dots 14^\circ$, а у сердцевины – $\alpha_{ст} = 15 \dots 20^\circ$.

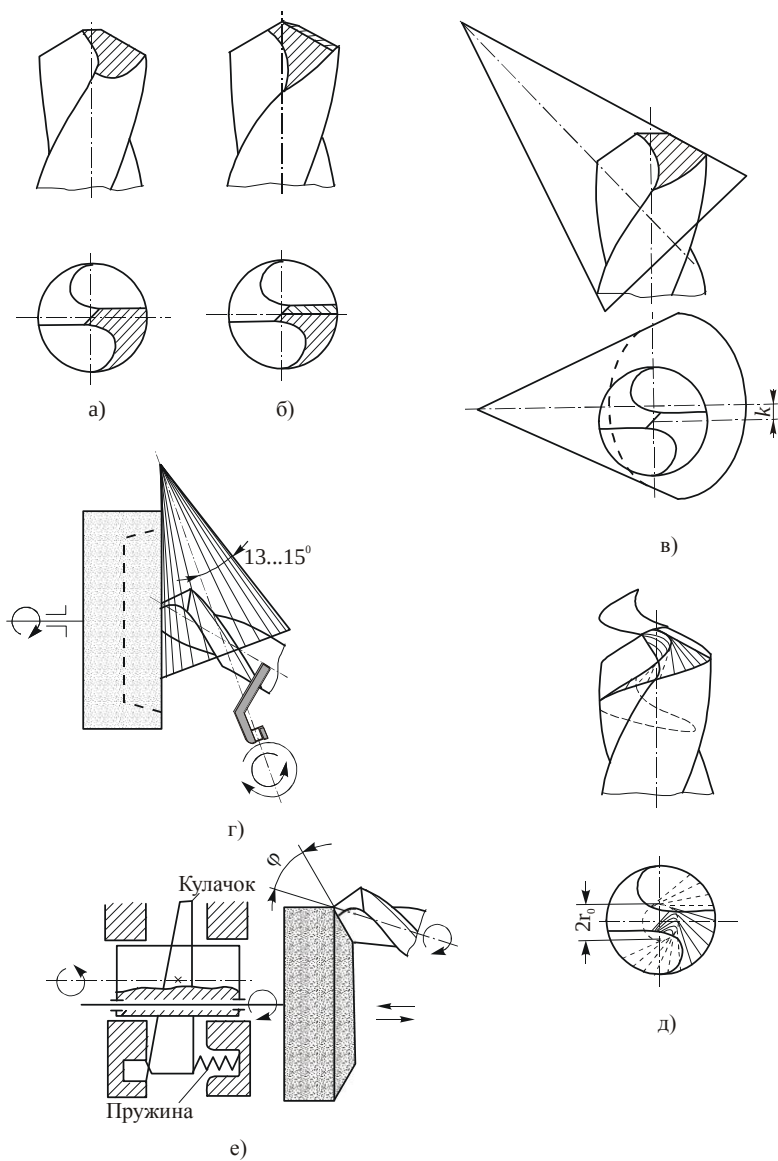


Рис. 4.7. Методы заточки спиральных сверл: а – одноплоскостная; б – двухплоскостная; в, г – коническая; д, е – винтовая

Методы заточки спиральных сверл. Технологически наиболее простой является заточка по одной или двум плоскостям. Однако при **одноплоскостной заточке** (рис. 4.7, а), чтобы концы перьев сверла не контактировали с обработанной поверхностью, приходится принимать большие значения задних углов $\alpha = 20 \dots 25^\circ$, что резко ослабляет режущий клин. Поэтому такой метод нашел применение только при заточке сверл малых диаметров ($d < 3$ мм), когда ширина перьев мала.

Двухплоскостная заточка (рис. 4.7, б) отличается тем, что часть задней поверхности, прилегающая к главной режущей кромке, затачивается с оптимальными задними углами, а конец пера – под значительно большими углами. Это обеспечивает большую прочность режущих клиньев, более благоприятную картину изменения передних углов на поперечной режущей кромке, образуемой при пересечении главных задних поверхностей перьев, и лучшие условия засверливания. Недостатками этого метода заточки является прерывистость при заточке каждого пера и, как следствие, возможность осевого биения режущих кромок. Этот метод нашел широкое применение при заточке на универсально-заточных или специальных станках твердосплавных сверл.

Весьма распространенным методом заточки быстрорежущих сверл, особенно больших диаметров, является **заточка по конической поверхности** (рис. 4.7, в), которая производится на специальных или универсально-заточных станках с использованием особых приспособлений (рис. 4.7, з). Хотя этот метод заточки прост в исполнении и обеспечивает благоприятную картину изменения угла α по режущим кромкам, главными его недостатками являются прерывистость процесса заточки и наличие больших отрицательных углов на поперечной режущей кромке. Величина угла α регулируется смещением k оси сверла.

Наибольшее применение в серийном производстве сверл нашла **заточка по винтовой поверхности** (рис. 4.7, д), осуществляемая на специальных станках в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Благодаря специальной кинематике движения шлифовального круга (рис. 4.7, е) заточка осуществляется при непрерывном вращении сверла и обеспечивает наилучшую симметричность главных режущих кромок и лучшую геометрию поперечной кромки.

Геометрические параметры поперечной режущей кромки. Поперечная режущая кромка сверла формируется при заточке как линия пересечения задних поверхностей перьев. Фактически она состоит из двух полукромки AO и OB (рис. 4.8, а) являющихся продолжением до оси двух главных режущих кромок. Передние и задние поверхности этих полукромки являются частью главных задних поверхностей сверла.

При всех методах заточки передние углы на полукромках имеют отрицательные значения. Наибольшее из них будет при конической заточке ($\gamma_N \approx -\varphi$) (рис. 4.8, б), а наименьшее – при винтовой заточке (рис. 4.8, в). По этой причине на поперечную режущую кромку, несмотря на ее небольшую длину, приходится до 40...60% осевой составляющей силы резания (силы подачи). В сочетании с большой длиной главных режущих кромок это сдерживает увеличение подачи, а следовательно, и производительности процесса сверления. Наибольшее значение осевой составляющей силы резания будет при конической, а наименьшее – при винтовой заточке.

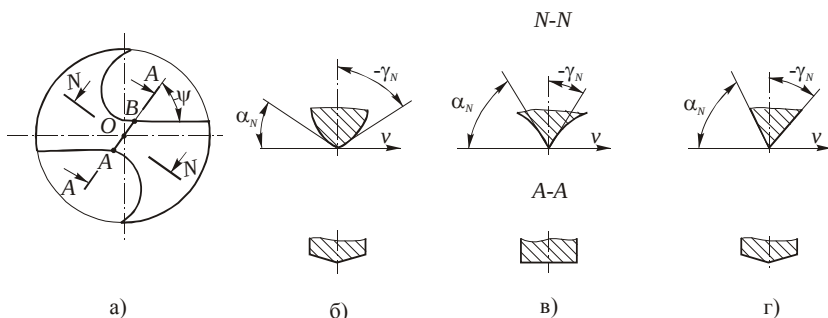


Рис. 4.8. Геометрические параметры поперечной режущей кромки спирального сверла: а – вид сверла с торца; б – коническая заточка; в – винтовая заточка; г – двухплоскостная заточка

Наилучшие условия засверливания дают заточки по конусу (рис. 4.8, б) и по двум плоскостям (рис. 4.8, г), у которых центр является самой высшей точкой режущей кромки.

Другой геометрический параметр поперечной режущей кромки – угол ψ ее наклона к главной режущей кромке. От него зависит длина поперечной кромки:

$$AB = d_0 \sin \psi.$$

Т а б л и ц а 4.2

Влияние диаметра сверла на величину углов α и ψ

Диаметр сверла d , мм	α°	ψ°
2,0...5,0	12	48
5,1...11,0	9	50
11,1...18,0	8	52
18,5...80,0	8	55

Угол ψ тесно связан с задним углом α на периферии сверла, его диаметром и методом заточки. Этот угол может служить также одним из критериев правильности заточки сверла. Для стандартных спиральных сверл рекомендуемые значения этих углов в зависимости от диаметра сверла приведены в табл. 4.2.

4.3. 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 $\alpha_1 = 6 \dots 8^\circ$ с оставлением небольшой фаски шириной $f = 0,3 \dots 0,1$ мм на длине $\ell = (0,1 \dots 0,2)d$, чтобы не ухудшить направление сверла в отверстии (рис. 4.9, а). Благодаря этому снижается сила трения на ленточках, а при сверлении сталей на них предотвращается налипание мелкой стружки, что приводит к повышению стойкости инструмента.

2. Применяют различные способы подточки поперечной режущей кромки, снижающие осевую составляющую силы резания, улучшающие условия засверливания и увеличивающие производительность процесса сверления за счет увеличения подачи. Некоторые способы подточки представлены на рис. 4.9, б. Они связаны с уменьшением либо длины этой кромки, либо отрицательных значений передних углов. При сверлении углеродистых сталей повышенной твердости и высоколегированных сталей рекомендуется подточка по передним поверхностям полукромки с оставлением фаски и центра сверла. Рекомендуемое отдельными авторами перерезание поперечной кромки с образованием новых полукромки приводит к ослаблению и разрушению центра сверла (рис. 4.9, в). Оно применимо лишь при сверлении чугунов и обеспечивает снижение осевой силы до 50%. За счет этого возможно значительное увеличение подачи.

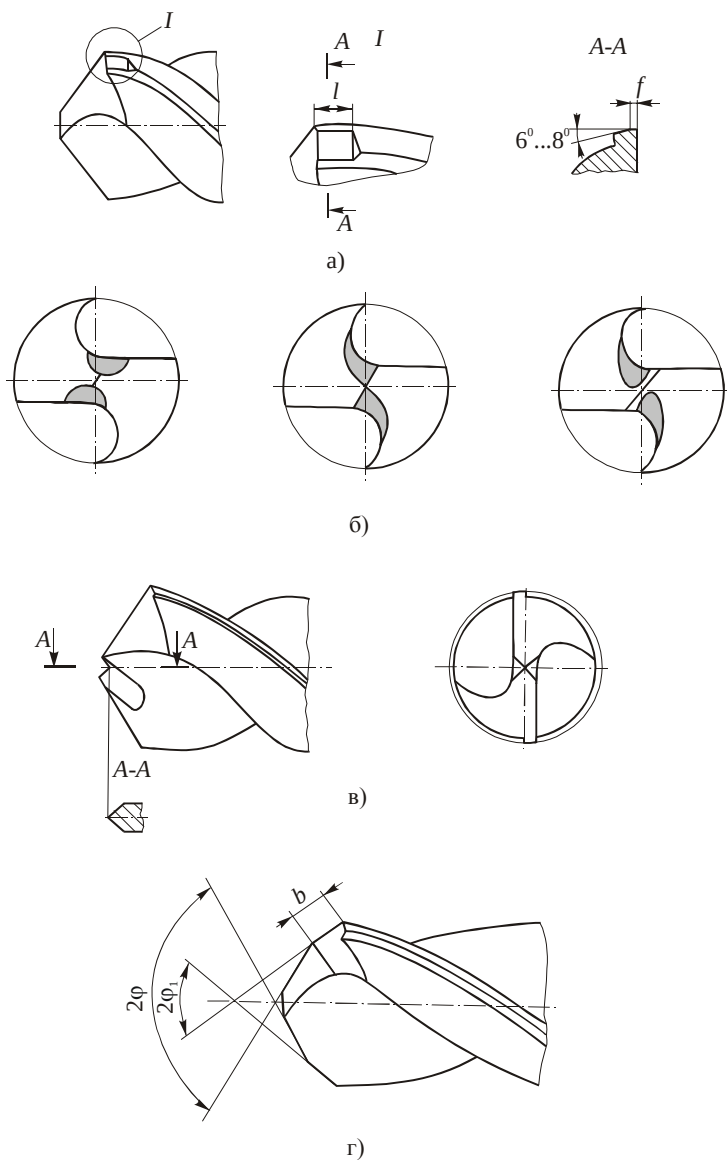


Рис. 4.9. Способы улучшения геометрии спиральных сверл путем заточки: а – подточка ленточки; б, в – подточка поперечной кромки; г – заточка с двойным углом при вершине

3. Применяется заточка под двойными углами при вершине сверла (рис. 4.9, з). 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 $3 \dots 4$ раза.

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

4.4. Особенности конструкций твердосплавных сверл

Несмотря на то, что использование твердых сплавов обеспечивает двух-, четырехкратное повышение производительности, удельный вес твердосплавных сверл в общем объеме их применения составляет не более 10%. Это объясняется неблагоприятными условиями работы твердых сплавов при сверлении: жестким (консольным) креплением сверл; большими осевыми нагрузками; переменной величиной скорости резания, уменьшающейся до нуля на поперечной режущей кромке; большой шириной срезаемой стружки; опасностью появления вибраций и пакетирования стружки в канавках сверла; малыми числами оборотов и недостаточными мощностью, жесткостью и точностью сверлильных станков.

Более широкое распространение твердосплавные сверла получили при сверлении чугунов, цветных металлов и неметаллических материалов (мрамор, кирпич, пластмассы и т.п.). При сверлении сталей часто наблюдается выкрашивание режущих кромок, особенно в виде разрушения поперечной режущей кромки.

Повышение жесткости сверл, использование внутреннего напорного охлаждения и другие усовершенствования позволяют получать хорошие результаты при сверлении труднообрабатываемых сталей и сплавов, т.е. там, где быстрорежущие сверла имеют очень низкую стойкость.

Для оснащения сверл используют твердые сплавы марок ВК8, ВК10М, ВК15М, обладающие наибольшей прочностью.

Повышение прочности и жесткости сверл обеспечивают за счет максимально возможного сокращения длины рабочей части инструмента, хотя при этом приходится сокращать запас на переточку. С этой же

целью увеличивают диаметр сердцевины сверл до $d_0 = (0,25 \dots 0,35)d$ и выполняют подточку поперечной режущей кромки.

Мелкогабаритные сверла ($d = 2 \dots 6$ мм) изготавливают цельными твердосплавными или составными, когда хвостовик изготавливается из стали (рис. 4.10, а), а рабочая часть – из твердого сплава. Сверла $d = 10 \dots 30$ мм оснащают напайными пластинами или коронками из твердого сплава (рис. 4.10, б, в). При этом корпус сверла изготавливается из стали 9ХС или Р6М5. На корпусах таких сверл направляющие ленточки обычно не делают, так как при высоких скоростях резания, допускаемых твердым сплавом, они быстро выходят из строя и не выполняют роли направляющих сверла.

Обратная конусность предусматривается только на твердосплавной режущей части с созданием вспомогательных углов в плане $\varphi_1 = 25 \dots 30'$. Диаметр корпуса сверла занижается на $0,2 \dots 0,3$ мм по сравнению с диаметром конца твердосплавной части.

Геометрические параметры режущей части: угол при вершине $2\varphi = 120 \dots 140^\circ$, угол наклона стружечных канавок $\omega = 0 \dots 20^\circ$, заточка двух- или трехплоскостная с задним углом на главных режущих кромках $\alpha = 7 \dots 9^\circ$. Передний угол на твердосплавных пластинах $\gamma = 8^\circ$, а на коронках с винтовыми канавками переменный, как у быстрорежущих сверл, зависящий от угла ω . Хвостовик конический или чаще всего цилиндрический, как более технологичный.

Для снижения осевого усилия применяется подточка поперечной режущей кромки с сокращением ее длины до $(0,10 \dots 0,15)d$. Так как места пайки пластины и коронки расположено близко от зоны резания, то иногда в процессе сверления наблюдаются случаи отпаивания и разрушения твердосплавной части. Этого можно избежать, если использовать подачу СОЖ через внутренние каналы в корпусе сверла, так как СОЖ снижает температуру резания, интенсивность износа режущих кромок и обеспечивает надежный вывод стружки из отверстия. Такие сверла можно с успехом использовать даже при сверлении труднообрабатываемых сталей.

Наибольшую надежность имеют **сверла с напайными твердосплавными коронками и каналами для внутреннего подвода СОЖ**, выпускаемые рядом зарубежных фирм. В этом случае длина коронок принимается равной $(1 \dots 2)d$, угол при вершине $2\varphi = 140^\circ$, угол наклона винтовых канавок $\omega = 20^\circ$, заточка двух- или трехплоскостная с подточкой поперечной режущей кромки, хвостовик цилиндрический с допуском по h_6 и лыской для крепления винтом в специальном патроне.

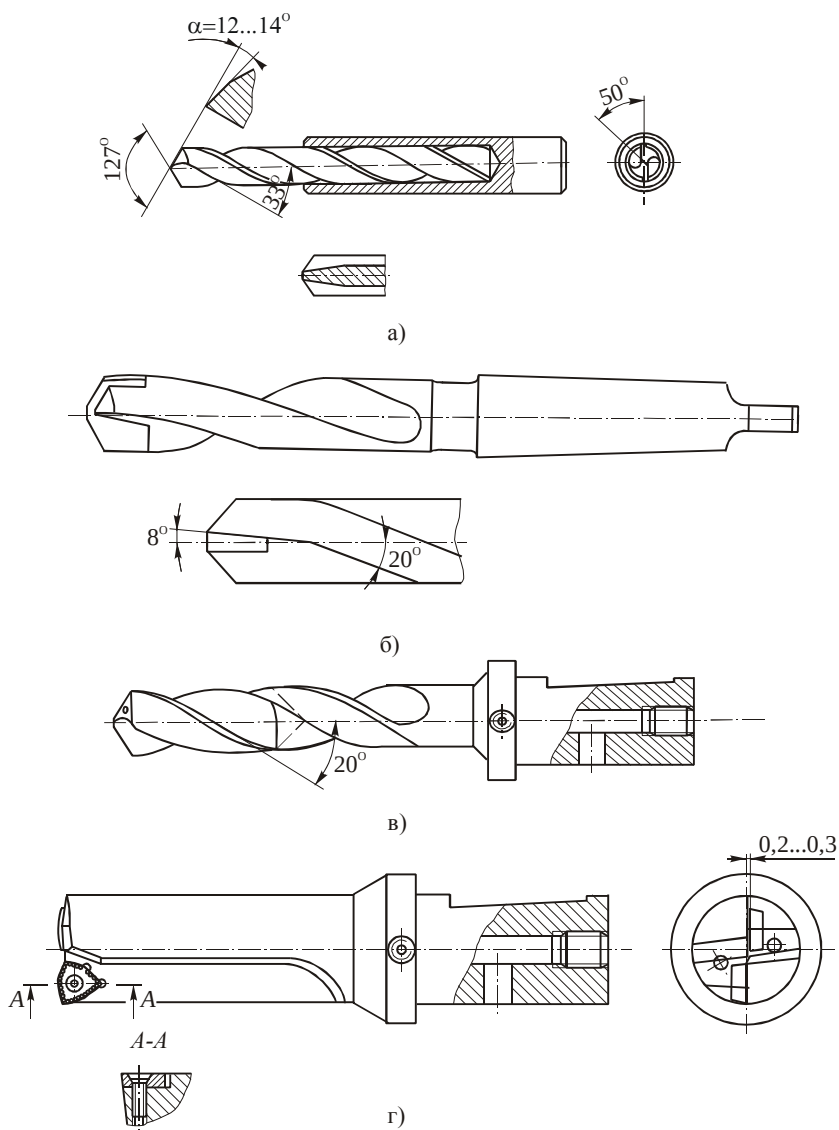


Рис. 4.10. Твердосплавные сверла: а – цельные; б – с напайными пластинами; в – с коронками; г – с механическим креплением СМП

В последние годы широкое применение нашли сверла, оснащенные неперетачиваемыми пластинами с механическим креплением на корпусе (рис. 4.10, *з*). Они используются для сверления отверстий глубиной $L = (3...4)d$ и диаметром $d = 20...60$ мм. При этом для повышения надежности сверл в их корпусах выполнены отверстия для подвода СОЖ в зону резания. Стружечные канавки чаще всего делают прямыми, как более технологичные. У сверл небольших диаметров стружечные канавки могут быть и винтовыми с углом наклона $\omega = 20^\circ$.

Применяемые в сверлах твердосплавные СМП позитивного типа с $\alpha > 0$ в форме параллелограмма, ромба, прямоугольника или неправильного треугольника с шестью режущими кромками и центральным отверстием конической формы для крепления винтом. Вдоль режущих кромок на пластинках при прессовании делают уступы или мелкие сферические лунки, обеспечивающие надежное дробление стружки (см. рис.2.8). Пластины располагаются с обеих сторон относительно оси сверла таким образом, что делят припуск по ширине с перекрытием в средней части. Одна из пластин обрабатывает центральную часть отверстия, а другая – периферийную. Поперечная режущая кромка у таких сверл отсутствует, а хвостовик делается цилиндрическим даже у сверл больших диаметров.

4.5. Сверла для сверления глубоких отверстий

К глубоким отверстиям обычно относят отверстия, глубина которых превышает $5d$. Однако уже при $h > 3d$ в случае сверления отверстий спиральными сверлами наблюдаются трудности с подводом СОЖ в зону резания и удалением стружки из отверстия, что приводит к снижению стойкости инструмента. Поэтому на практике применение инструментов для сверления глубоких отверстий обычно начинается с глубин, больших $3d$.

Основные трудности при сверлении глубоких отверстий заключаются: 1) в сложных условиях подвода СОЖ в зону резания и отвода стружки; 2) в уходе осей отверстий; 3) в погрешностях размера и формы отверстий в радиальном и продольном сечениях.

Улучшить условия отвода стружки из отверстий при использовании спиральных сверл можно за счет увеличения угла наклона канавок до $40...60^\circ$ и обеспечения надежного дробления стружки. В противном случае приходится периодически выводить сверло из отверстия для освобождения инструмента от стружки, что значительно снижает производительность, хотя при этом уход оси отверстия несколько уменьшается. Лучшие результаты дает использование внутреннего напорного под-

вода СОЖ в зону резания, которое обеспечивает не только надежный отвод стружки из отверстия, но и отвод тепла из зоны резания, благодаря чему повышается стойкость сверл. Причем эффективность СОЖ будет тем выше, чем выше скорость ее протекания через зону резания, которая определяется давлением и количеством (расходом) подаваемой жидкости.

На практике при сверлении отверстий глубиной до $20d$ на универсальном оборудовании часто используют **спиральные сверла удлиненной серии** или с **нормальной длиной режущей части и длинным хвостовиком** (рис. 4.11, *а*), равным глубине отверстия. В этом случае для освобождения сверла от стружки в процессе сверления применяется автоматический ввод-вывод инструмента из отверстия.

С целью уменьшения увода оси отверстий у таких сверл рекомендуется вышлифовывать на спинках четыре ленточки и увеличивать насколько возможно диаметр сердцевины (рис. 4.11, *а*). Некоторые фирмы выпускают такие сверла с увеличенным объемом канавок и большим углом их наклона к оси инструмента, достигающим до $\omega = 40^\circ$.

Для улучшения отвода стружки без вывода сверла из отверстия были предложены **шнековые сверла** (рис. 4.11, *б*), которые применяются чаще всего для сверления отверстий глубиной до $(30 \dots 40)d$ в деталях из чугуна и других хрупких металлов. Для сверления отверстий в сталях шнековые сверла применяются значительно реже и при этом наблюдается повышенный увод сверла. В отличие от стандартных спиральных сверл, они имеют большой угол наклона винтовых канавок $\omega = 60^\circ$, увеличенный диаметр сердцевины $d_0 = (0,30 \dots 0,35)d$. Полированные канавки имеют в осевом сечении прямолинейный треугольный профиль с рабочей стороной, перпендикулярной к оси сверла. Направляющие ленточки шнекового сверла примерно в 2 раза уже, чем у стандартных спиральных сверл. Так как угол ω у них очень большой, то для формирования рабочего клина с нормальным углом заострения необходима подточка по передней поверхности под углом $\gamma = 12 \dots 18^\circ$. Задний угол при плоскостной заточке $\alpha = 12 \dots 15^\circ$. При этом заточка сверла существенно усложняется.

Для обеспечения надежного стружкоудробрения без вывода сверл из отверстия при одновременном повышении стойкости применяют также спиральные быстрорежущие сверла с каналами для внутреннего подвода СОЖ. В нашей стране такие сверла изготавливаются диаметром от 10 до 30 мм (рис. 4.11, *в*). Их недостаток – повышенная трудоемкость изготовления, необходимость иметь для подвода СОЖ специальные патроны и насосные станции, а также ограждения от сходящей стружки и брызг СОЖ.

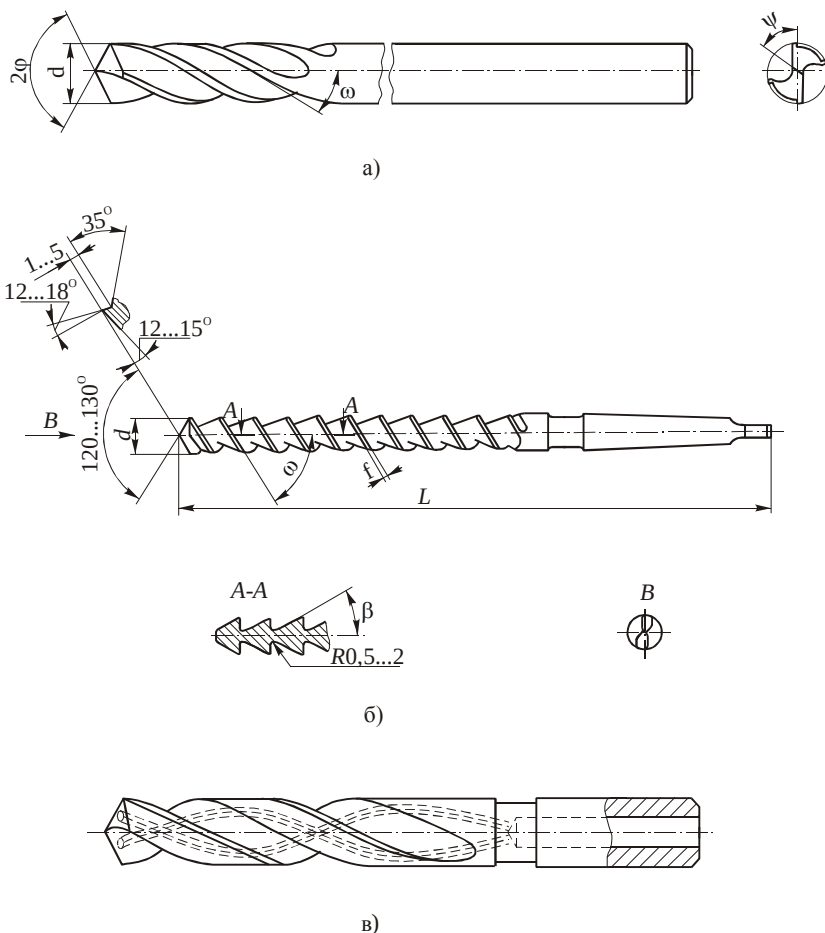


Рис. 4.11. Спиральные сверла для глубокого сверления: а – четырехленточное с длинным хвостовиком; б – шнековое; в – с внутренним напорным охлаждением

Увод сверл с двумя симметрично расположенными главными режущими кромками происходит из-за малой жесткости консольно закрепляемых инструментов, неизбежных погрешностей заточки режущих кромок, при наличии разнотвердости заготовок по сечению и т.д.

Самым эффективным способом, позволяющим свести до минимума увод и повысить точность отверстий, является способ базирования режущей части инструмента с опорой на обработанную поверхность. С

этой целью предусматривается такое расположение режущих кромок, когда заведомо создается неуравновешенная радиальная составляющая силы резания, прижимающая опорные направляющие корпуса к поверхности отверстия, которые обработаны впередиидущими режущими кромками (рис. 4.12). При этом засверливание должно производиться по кондукторной втулке или по предварительно подготовленному в заготовке отверстию глубиной $(0,5 \dots 1,0)d$.

Инструменты, работающие по такому принципу, называются **инструментами с определенностью базирования** или **инструментами одностороннего резания** [7, 9]. К ним относятся пушечные и ружейные сверла, сверлильные головки БТА и эжекторные сверла. Они могут быть с одной или несколькими режущими кромками, но в любом случае суммарная радиальная составляющая сил резания и трения R для осуществления принципа определенности базирования должна быть направлена строго к опорной поверхности и расположена между направляющими пластинами.

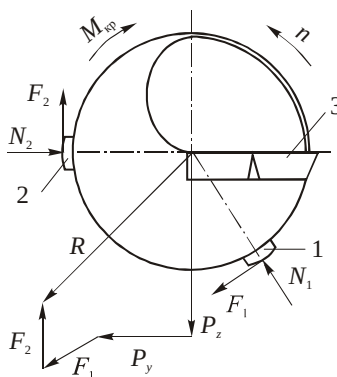


Рис. 4.12. Схема сил, действующих в плоскости, перпендикулярной к оси сверла с определенностью базирования: 1, 2 – твердосплавные направляющие пластины; 3 – твердосплавная режущая пластина

На увод оси отверстия, даже при использовании инструментов с определенностью базирования, значительное влияние также оказывает кинематика движения заготовки и сверла, особенно заметное при больших глубинах отверстий. Так, на рис. 4.13 приведены данные по уводу оси для трех схем сверления: 1) заготовка вращается, а сверло совершает движение подачи; 2) заготовка и сверло вращаются в противополож-

ных направлениях; 3) заготовка неподвижна, вращается сверло. Наилучшим является второй вариант, но к нему близок и первый. Худшие результаты дает третья схема, которая применяется в случаях сверления несимметричных заготовок с большой массой (например, корпусные детали).

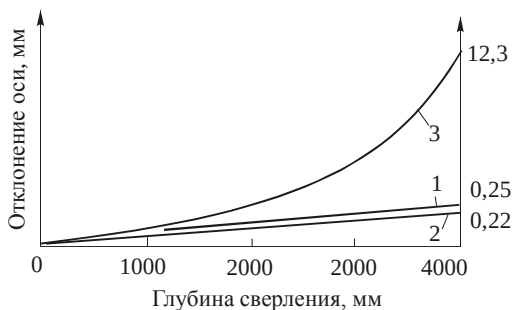


Рис. 4.13. Увод оси отверстия в зависимости от схемы сверления: 1 – заготовка вращается, сверло неподвижно; 2 – заготовка и сверло вращаются в противоположных направлениях; 3 – заготовка неподвижна, сверло вращается

Исторически первой и наиболее простой конструкцией сверла глубокого сверления являются **пушечные сверла**, название которых говорит об области их первоначального применения. Такое сверло (рис. 4.14, а) представляет собой стержень большой длины, равной глубине обрабатываемого отверстия, срезанный в рабочей части примерно до половины диаметра и заточенный с торца с задним углом α . Во избежание заедания сверла в отверстии передняя грань расположена выше оси инструмента на величину 0,2...0,5 мм. Сверло имеет одну главную режущую кромку, перпендикулярную к оси. С другой стороны от оси сверла по торцу делают срез под углом 10° , отступив от оси на расстояние 0,5 мм. Со стороны вспомогательной режущей кромки на наружной поверхности срезают лыску под углом 30° с оставлением цилиндрической ленточки шириной $f = 0,5$ мм. У пушечного сверла передний угол $\gamma = 0^\circ$, а задний $\alpha = 8...10^\circ$. Для снижения осевой составляющей силы резания передняя поверхность пушечного сверла выполняется по радиусу R с очень небольшим занижением около оси инструмента. В про-

цессе сверления радиальная односторонне направленная нагрузка воспринимается цилиндрической поверхностью сверла, опирающейся на стенку обработанного отверстия.

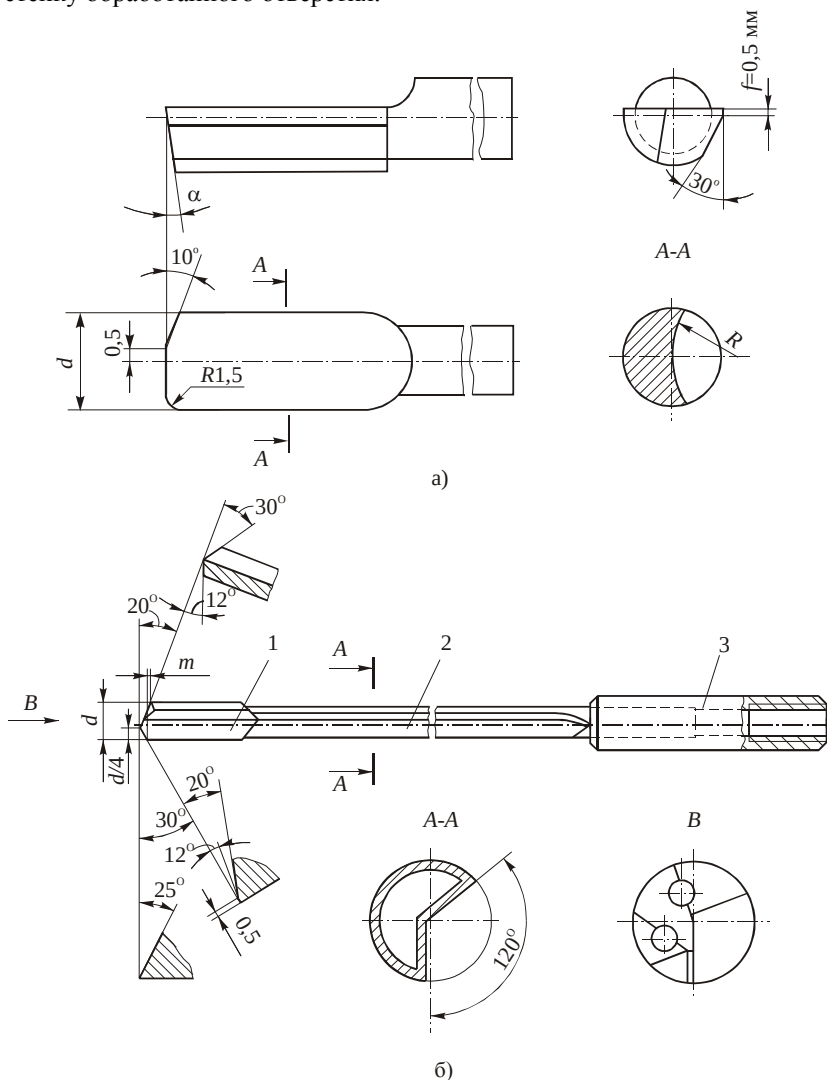


Рис. 4.14. Сверла для сверления глубоких отверстий: а – пушечное ($d = 3 \dots 36 \text{ мм}$); б – ружейное ($d = 1 \dots 30 \text{ мм}$)

Пушечное сверло работает в тяжелых условиях. При этом не обеспечивается непрерывный отвод стружки, в связи с чем приходится сверло периодически выводить из отверстия. Из-за низкой поперечной жесткости и большой ширины срезаемого слоя оно склонно к вибрациям, поэтому работает с малыми подачами. Такие сверла в настоящее время применяются редко, только в условиях единичного и мелкосерийного производств.

Ружейные сверла (рис. 4.14, б) в отличие от пушечных, имеют внутренний канал для подвода СОЖ и прямую (иногда винтовую) канавку для наружного отвода пульпы (смесь стружки и СОЖ). Они применяются для сверления отверстий глубиной $(5...100)d$ и диаметром $1...30$ мм. Первоначально ружейные сверла использовали для сверления стволов огнестрельного оружия. В настоящее время ружейные сверла получили широкое распространение во всех отраслях машиностроения, главным образом для сверления глубоких отверстий на специальных станках в условиях крупносерийного и массового производств. Благодаря оснащению твердым сплавом и внутренней подаче СОЖ они обеспечивают высокую производительность при сверлении отверстий с минимальным уводом оси при высокой точности ($H8...H9$) и низкой шероховатости поверхности отверстий ($Ra 0,32...1,25$ мкм).

Типовая конструкция ружейного сверла состоит из режущего твердосплавного наконечника 1 (рис. 4.14, б) с отверстием для подвода СОЖ, трубчатого стебля 2 из стали типа 30ХМА с V-образной канавкой для отвода стружки, полученной методом холодной пластической деформации, и цилиндрического хвостовика 3 для крепления на станке. Ружейные сверла диаметром менее 2 мм ряд зарубежных фирм изготавливает цельными твердосплавными.

Геометрические параметры режущей части ружейного сверла показаны на рис. 4.14, б. Главная режущая кромка для снижения радиальной нагрузки ломаная, состоит из двух полукромки с углами в плане $\varphi_1 = 30^\circ$ и $\varphi_2 = 20^\circ$. Для восприятия суммарной радиальной нагрузки у сверл малых диаметров имеется опорная цилиндрическая поверхность, а у сверл $d > 10$ мм – две опорные направляющие, между которыми должен проходить вектор радиальной составляющей сил резания и трения.

Для снижения сил трения и во избежание защемления сверла в отверстии предусматривается обратная конусность по диаметру режущей

части (наконечника) в пределах 0,06...0,10 мм на 100 мм длины. На вспомогательной режущей кромке оставляется цилиндрическая ленточка шириной $f = 0,1 \dots 0,5$ мм.

При заточке ружейного сверла (рис. 4.14, б) необходимо контролировать размер m , который, во избежание врезания торцев, направляющих в дно отверстия, должен быть не меньше двух – трех значений подачи сверла на один оборот. На переднем торце трубчатого стебля фрезеруется паз, в который припаивается твердосплавный наконечник. С противоположного конца стебель впаивается в цилиндрический хвостовик, имеющий диаметр на 6...10 мм больший, чем диаметр стебля.

Технические требования к изготовлению ружейных сверл весьма жесткие. Так, рабочая часть шлифуется с допуском по $h5$ или $h6$, а хвостовик – по $h6$. Радиальное биение наконечника относительно хвостовика не более 0,01...0,02 мм. При настройке операции необходимо обеспечить соосность шпинделя и сверла в пределах 0,01 мм, а соосность кондукторной втулки и шпинделя станка – в пределах 0,005 мм.

Так как твердосплавные направляющие выглаживают поверхность отверстия, СОЖ должна быть только на масляной основе с противозадирными присадками (S, Cl, P). Применение эмульсий на водной основе приводит к затиранию направляющих и возникновению вибраций.

Давление и расход СОЖ зависят от диаметра сверла. Так, например, при малых диаметрах сверл давление СОЖ достигает 9...10 МПа.

К числу недостатков ружейных сверл можно отнести малые поперечную и крутильную жесткости из-за ослабленного канавкой стебля. По этой причине приходится снижать подачу, а следовательно, и производительность процесса сверления.

Сверла и сверлильные головки БТА* отличаются тем, что при малых диаметрах сверления (рис. 4.15, а) твердосплавные режущие и направляющие пластины напаиваются непосредственно на трубчатый стебель, а при больших диаметрах – на головки (рис. 4.15, б...д), навинчиваемые на стебель.

Головки изготавливают различными по конструктивному исполнению: однокромочными (рис. 4.15, б, в), многокромочными (рис. 4.15, з, д), перетачиваемыми, неперетачиваемыми, с напайными или сменными ($d \geq 20$ мм) режущими и направляющими пластинами.

* Обозначаются по названию международной ассоциации «Bohring and Trepanning Association» (БТА).

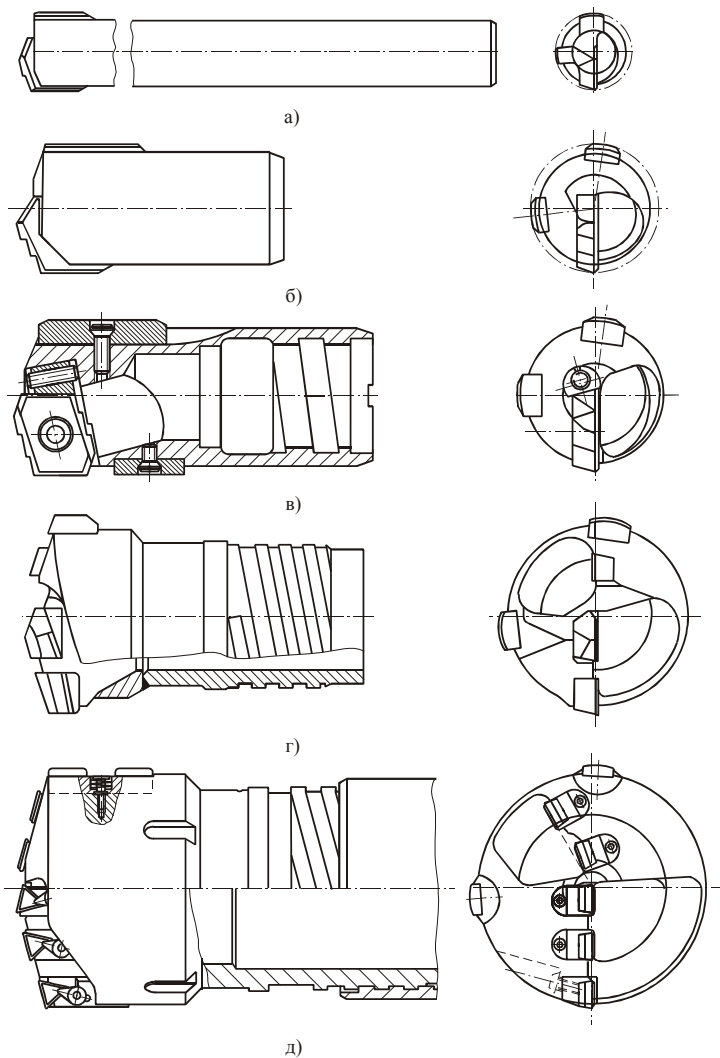


Рис. 4.15. Сверлильные головки БТА: а – однокромочное сверло с напайной Т-образной твердосплавной пластиной ($d = 6 \dots 18$ мм); б – однокромочная напайная головка ($d = 18 \dots 30$ мм); в – однокромочная головка с механическим креплением режущих и направляющих пластин ($d = 18 \dots 65$ мм); г – многокромочная напайная головка БТА ($d = 18 \dots 65$ мм); д – многокромочная головка с механическим креплением режущих и направляющих пластин ($d > 65$ мм)

В отличие от ружейных сверл, сверла и головки БТА имеют толстостенный стебель кольцевого сечения и работают с наружной подачей СОЖ между стенками стебля и обработанного отверстия и с внутренним отводом СОЖ и стружки через отверстия в головке и стебле. Подача СОЖ производится с помощью специальных маслоприемников, которые устанавливаются на специальных станках для обработки глубоких отверстий, обеспечивающих торцевое уплотнение между заготовкой и кондукторной втулкой.

Достоинства сверл БТА состоят в том, что благодаря высокой жесткости трубчатого стебля подача, по сравнению с ружейными сверлами увеличивается примерно в 2...4 раза, а стружка, удаляемая из зоны резания по внутреннему каналу, не портит обработанную поверхность.

К недостаткам сверл БТА следует отнести трудности с надежным удалением стружки через относительно небольшое по сечению входное отверстие в режущей части, при закупоривании которого процесс сверления становится невозможным.

Для хорошего дробления стружки на напайных твердосплавных пластинах затачиваются стружкодробящие уступы, а на механически закрепляемых твердосплавных СМП предусматриваются сферические мелкие лунки, получаемые в процессе изготовления пластин. Хорошее деление стружки по ширине и увеличение площади сечения входных отверстий обеспечивают многокромочные головки фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция). При этом за счет разности нагрузки на пластины, расположенные с обеих сторон оси головки, обеспечивается принцип одностороннего резания, так как в этом случае равнодействующая радиальных составляющих сил резания и трения проходит между двумя направляющими и прижимает головку к обработанной поверхности отверстия.

В головках с механическим креплением твердосплавных пластин удается избежать недостатков метода пайки, указанных выше, трудоемкой по исполнению заточки и обеспечить быстросменность пластин.

Сложные по конструкции корпуса головок БТА изготавливают методом точного литья с последующей нарезкой ленточной резьбы на хвостовой части. У сверл крупных диаметров корпуса изготавливают фрезерованием и точением на станках с ЧПУ. При сверлении отверстий малых диаметров ($d = 6...20$ мм) применяются опытные конструкции сверл БТА, выполненные путем врезания и пайки Т-образных твердосплавных пластин в стальной трубчатый стебель (рис. 4.15, а). Однако в этом случае трудности с удалением стружки возрастают еще в большей степени. Гарантированная глубина сверления отверстий сверлами БТА

при горизонтальном положении заготовки достигает $100d$, а при вертикальном – $50d$.

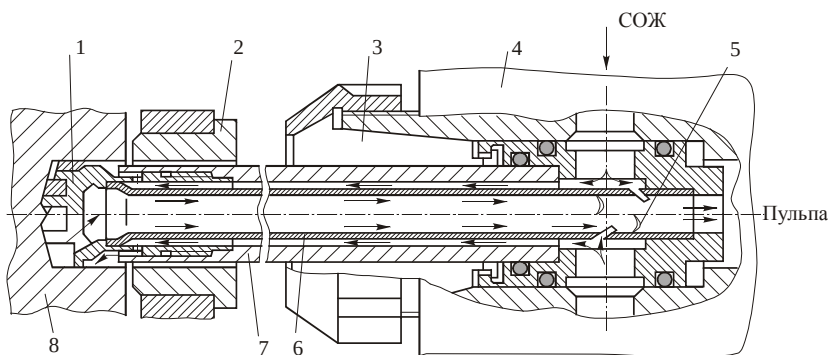


Рис. 4.16. Схема работы эжекторного сверла: 1 – режущая головка; 2 – кондукторная втулка; 3 – цанга; 4 – зажимной патрон; 5 – сопла эжектора; 6 – тонкостенная труба; 7 – стебель; 8 – заготовка

Режущие головки **эжекторных сверл** по конструкции подобны головкам БТА (рис. 4.16). Некоторые отличия между ними объясняются способами подвода СОЖ и отвода пульпы (смесь стружки и СОЖ), суть которых состоит в том, что подвод осуществляется между стенками стебля 7 и тонкостенной трубой 6, вставленной внутри стебля, и далее через отверстия в корпусе головки в зону резания. В хвостовой части тонкостенной трубы прорезаны С-образные пазы, исполняющие роль сопла 5 эжектора, отсасывающего пульпу через внутреннюю полость этой трубы. Таким образом, подаваемая через специальный патрон СОЖ делится на два потока: рабочий, идущий в зону резания, и вспомогательный, идущий на слив и составляющий примерно $1/3$ от общего количества СОЖ. Именно этот вспомогательный поток и создает разрежение во внутренней трубе. Под действием атмосферного давления рабочий поток, пройдя через зону резания, вместе со стружкой всасывается в зону пониженного давления и уходит на слив. Благодаря такому устройству эжекторные сверла могут использоваться на универсальных станках. При этом не требуются специальные маслоприемники, а подача и отвод СОЖ осуществляются с помощью специальных патронов 4, устанавливаемых в шпинделе сверлильного станка или задней бабке токарного станка.

Эжекторные сверла $d = 18 \dots 65$ мм чаще всего оснащают напайными твердосплавными пластинами, а $d = 65 \dots 185$ мм и более – механически

закрепляемыми СМП. Максимальная глубина отверстий, полученных эжекторными сверлами, достигает 4000 мм.

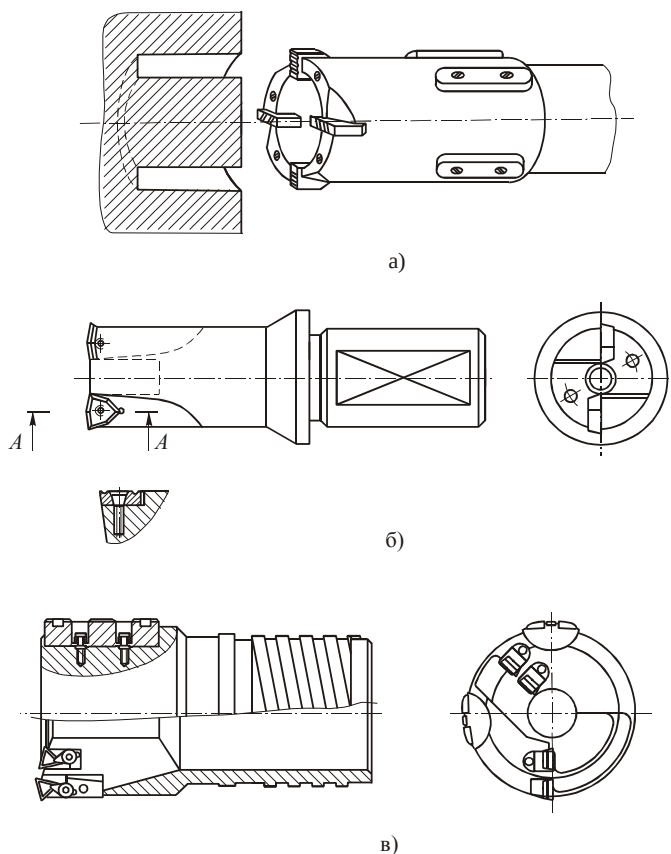


Рис. 4.17. Кольцевые сверла: *а* – с механическим креплением режущих и направляющих пластин; *б* – для неглубоких отверстий, оснащенные СМП; *в* – оснащенные СМП головки одностороннего резания с внутренним отводом стружки для сверления глубоких отверстий

Сверла и головки для кольцевого сверления. При сплошном сверлении отверстий диаметром свыше 50 мм образуется большой объем стружки, требующий значительных затрат мощностей и инструментальных материалов. Усилия резания при этом резко возрастают. Чтобы избежать этого, используют способ кольцевого сверления, заключаю-

щийся в прорезании кольцевой канавки в заготовке с оставлением нетронутой сердцевины, которая в дальнейшем может быть использована в качестве заготовки деталей. За счет снижения силовой нагрузки на сверло можно значительно увеличить подачу, а следовательно, и производительность процесса сверления.

Простейшая конструкция кольцевого сверла в виде пустотелой трубы, на торце которой закреплены режущие ножи ($z = 3 \dots 12$), представлена на рис. 4.17, *а*. Над ножами прорезаны канавки для отвода сходящей стружки. Через отверстия в корпусе инструмента в зону резания под давлением подается СОЖ, которая удаляет стружку через зазор между сверлом и наружной стенкой кольцевой канавки, образуемой в заготовке. Для облегчения транспортировки стружки предусмотрено ее деление по ширине за счет специальной заточки ножей. Для более устойчивого положения сверла в отверстии на корпусе головки крепятся направляющие планки из твердой пластмассы, например из полиамида.

Для дробления стружки обычно на передних поверхностях режущих кромок затачивают уступы. Однако более надежное дробление стружки достигается в случае применения кинематического метода с наложением колебаний на движение подачи сверла.

Известны и другие конструкции кольцевых сверл, в том числе оснащенные твердосплавными СМП, закрепляемыми винтами. Такие сверла применяются для сверления как неглубоких (рис. 4.17, *б*), так и глубоких (рис. 4.17, *в*) отверстий. В последнем случае для уменьшения увода оси отверстия используется принцип одностороннего резания. При сверлении неглубоких отверстий диаметром $60 \dots 110$ мм, глубиной $2,5d$ применяют внутренний подвод СОЖ и наружный отвод стружки.

При сверлении глубоких отверстий диаметром $120 \dots 250$ мм и более и глубиной $100d$ применяют внутренний отвод стружки через отверстия в корпусе головки и стебле сверла. Для крепления пластин в сверлах больших диаметров используют промежуточные вставки. Такие сверла, кроме режущих пластин, имеют также опорные твердосплавные направляющие пластины.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Конструктивное исполнение перовых сверл. В чем их достоинства и недостатки? Где и в каких объемах они применяются?
2. Назовите основные конструктивные и геометрические параметры спиральных сверл.

3. Как изменяется передний угол у спиральных сверл? Приведите доказательство картины изменения углов γ и λ в разных точках главных режущих кромок сверла.
4. Каким образом движение подачи сверла влияет на задние углы в различных точках режущих кромок?
5. Покажите основные схемы заточки спиральных сверл. Как они влияют на геометрические параметры поперечной режущей кромки спирального сверла?
6. В чем заключаются недостатки геометрии спиральных сверл и как они устраняются при заточке?
7. Особенности сверления глубоких отверстий и применяемые типы сверл.
8. В чем заключается принцип одностороннего резания при сверлении глубоких отверстий и типы сверл, работающих по этому принципу?
9. Устройство эжекторных сверл. Их достоинства и недостатки.

5. ЗЕНКЕРЫ

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 $IT11 \dots IT10$ и уменьшения шероховатости обработанной поверхности до $Ra\ 40 \dots 10\ \mu\text{м}$.

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 ($t = 1,5 \dots 4,0\ \text{мм}$, $d = 18 \dots 80\ \text{мм}$), имеют большее число режущих кромок ($z = 3 \dots 4$) 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.

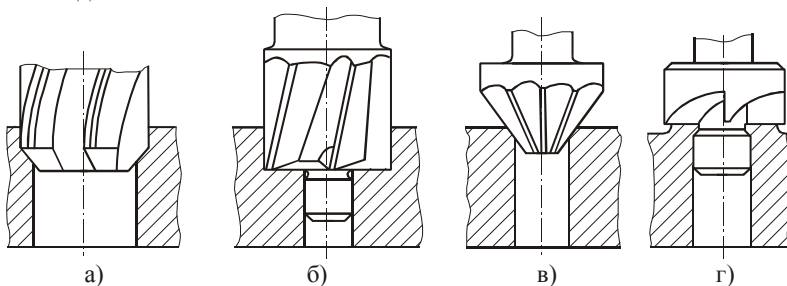


Рис.5.1. Типы зенкеров: а – цилиндрический зенкер; б, в, г – зенковки

Зенкеры классифицируют по следующим признакам:

а) вид обработки – цилиндрические зенкеры (применяются для увеличения диаметра отверстий (рис. 5.1, а)), зенковки (применяются для обработки цилиндрических или конических углублений под головки болтов, винтов, а также для снятия фасок (рис. 5.1, б, в), подрезки торцов бобышек и приливов на корпусных деталях (рис. 5.1, г));

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

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

г) вид режущего материала – быстрорежущие и твердосплавные.

5.1. Цилиндрические зенкеры

Цилиндрические зенкеры получили наибольшее распространение в механообработке. Они могут быть хвостовыми (рис. 5.2, а) и насадными (рис. 5.2, б). 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 .

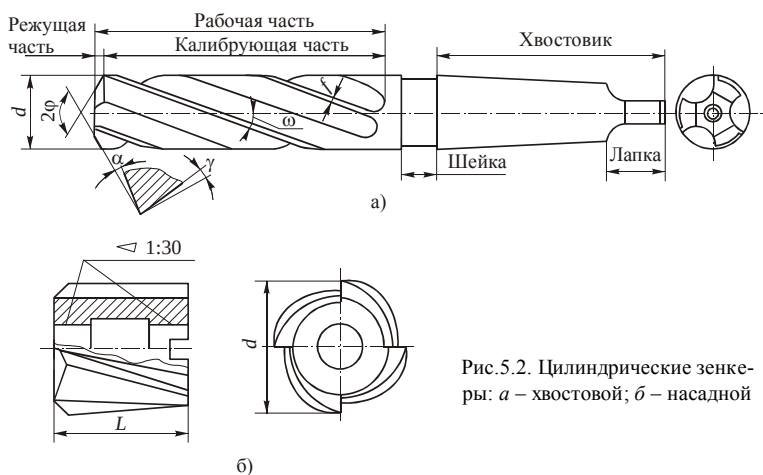


Рис.5.2. Цилиндрические зенкеры: а – хвостовой; б – насадной

Режущая часть зенкера предназначена для удаления припуска.

Ее длина (рис. 5.3)

$$\ell_1 = (t + a) \operatorname{ctg} \varphi = (1,5 \dots 2,0) t \operatorname{ctg} \varphi,$$

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 $\varphi_1 = 30^\circ$. При обработке чугунов угол $\varphi = 60^\circ$ или 45° .

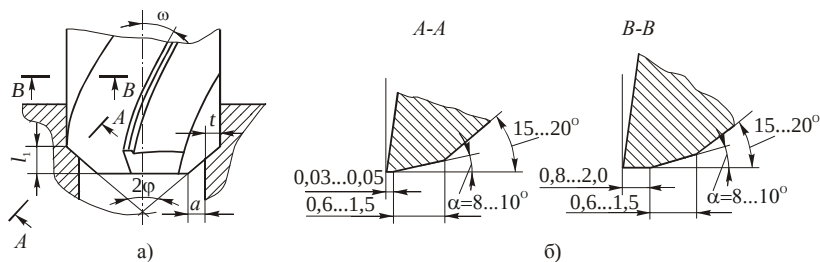


Рис. 5.3. Режущая часть зенкера: a – элементы режущей части; b – формы заточки зубьев зенкера

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.

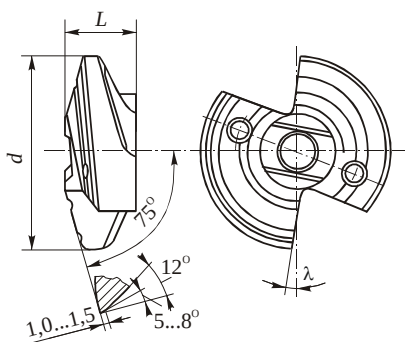


Рис. 5.4. Двухзубый зенкер-улитка

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. В тяжелом машиностроении для снятия больших припусков применяют двухзубые зенкеры (зенкеры-улитки), насаживаемые на оправки (рис. 5.4). Они имеют короткие и большие по объему канавки и служат для обработки отверстий диаметром до 300 мм.

Канавки зенкеров обычно винтовые, но могут быть и прямыми, например у твердосплавных зенкеров для обработки сталей и чугунов высокой твердости. У сборных зенкеров со вставными ножами, в том числе с напайными твердосплавными пластинами, канавки косые, наклонные к оси.

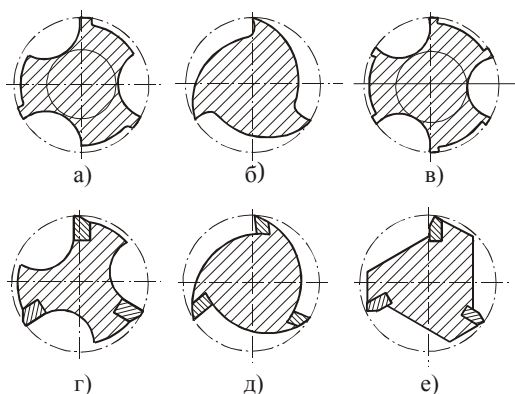


Рис. 5.5. Основные формы канавок зенкеров

На рис. 5.5 показаны некоторые формы канавок, применяемые разными инструментальными заводами. Криволинейная форма канавок (рис. 5.5, а...д) позволяет упростить изготовление зенкеров и сократить число операций, но требует специальных фасонных фрез. Канавки пря-

молинейного профиля (рис. 5.5, е) часто используются при оснащении насадных зенкоров напайными твердосплавными пластинами.

Передний угол γ_N ввиду малой длины главных режущих кромок и радиального их расположения можно определить по формуле (4.2) для спирального сверла без учета изменения радиуса точек кромки, т.е.

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \operatorname{tg} \gamma_{\text{пр}} / \sin \varphi = \operatorname{tg} \omega / \sin \varphi$$

Отсюда при заданном значении γ_N угол наклона стружечных каналов $\operatorname{tg} \omega = \operatorname{tg} \gamma_N \sin \varphi$.

При проектировании новых зенкоров рекомендуются следующие значения этих 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 зенкоров с напайными твердосплавными пластинами создают угол наклона главной режущей кромки $+\lambda$ (рис.5.6), предохраняющий от выкрашивания место стыка главных режущих и вспомогательных кромок. Рекомендуется брать угол $\lambda = 12 \dots 15^\circ$. При этом сход стружки происходит в направлении к хвостовику, а режущая кромка имеет превышение r_0 над осевой плоскостью, отсюда

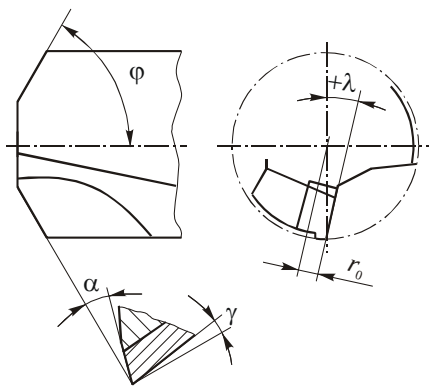


Рис.5.6. Угол λ наклона главной режущей кромки зенкера

$$\sin \lambda = \frac{r_0}{r} \sin \varphi$$

Задний угол α у зенкоров, 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...0,05 мм (рис. 5.3, а). При этом величина биения режущей кромки должна быть не более 0,05...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.

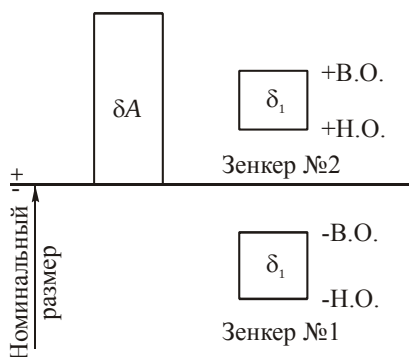


Рис. 5.7. Расположение полей допусков на обработанное отверстие и зенкеры № 1 и 2

допуска на обработанное отверстие (δA) и линии номинала с учетом припуска на развертывание, т.е. верхнее и нижнее отклонения диаметра зенкера берутся со знаком «-».

У зенкера № 2 поле допуска на диаметр зенкера перекрывается полем допуска на отверстие, т.е. оба отклонения имеют знаки «+». При этом поле допуска на изготовление зенкера равно примерно $0,25\delta A$, а верхнее отклонение берется с учетом возможной разбивки отверстия, равной $(0,3...0,4)\delta A$.

Сборные зенкеры с целью экономии инструментальных материалов оснащают ножами, закрепляемыми в корпусе из конструкционной стали, который обычно крепится на оправке отверстием с конусностью 1:30 и торцевой шпонкой (рис. 5.8, а, б).

Режущие ножи зенкеров изготавливают из быстрорежущей стали Р6М5 или с напайными пластинами из твердых сплавов марок ВК8, Т15К6 и др.

Корпус зенкера снабжен клиновидными пазами с углом $5...7^\circ$, в которые устанавливаются ножи с рифлениями на их опорных поверхностях (рис. 5.8, а). После износа зенкера возможно регулирование его

Допуск на диаметр зенкеров устанавливается в зависимости от назначения зенкера и допуска на обработанное отверстие. По назначению, величине и расположению допуска на диаметр отверстия различают: зенкер № 1 – для обработки отверстий под развертывание и зенкер № 2 – для окончательной обработки отверстий. Относительное расположение полей допусков на отверстие и зенкеры показано на рис. 5.7.

У зенкера № 1 поле допуска на диаметр (δ_1) лежит ниже поля

диаметра за счет перестановки пластин по рифлениям. Недостатком такой конструкции является невозможность регулирования вылета пластин вдоль оси зенкера. Чтобы исправить этот недостаток, зенкеры с опорной стороны дополнительно снабжают клиньями (рис.5.8, б). При этом ножи и клинья вставляются в плоские пазы, благодаря чему оказывается возможным двойное регулирование: по диаметру и вдоль оси. Однако конструкция такого зенкера несколько усложняется.

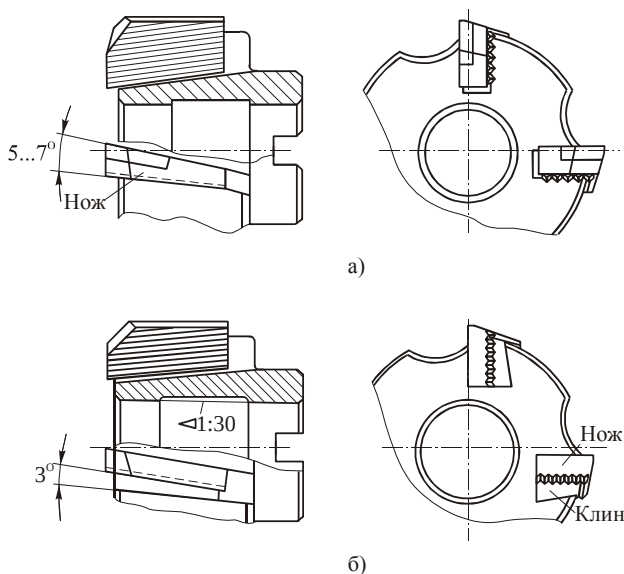


Рис.5.8. Типы крепления ножей сборных зенкеров: а – клиновидные рифленные ножи; б – плоские ножи с клиньями

При обработке отверстий твердосплавными зенкерами условия резания более благоприятны, чем при сверлении, благодаря большей жесткости инструмента, меньшей нагрузке на режущий клин, лучшим условиям отвода стружки и направления инструмента в отверстие.

Для обработки отверстий малых диаметров ($d = 8...20$ мм) используют цельные твердосплавные зенкеры, изготавливаемые из пластифицированных заготовок с последующим их спеканием либо полученных путем вышлифовывания профиля алмазными кругами на станках с ЧПУ.

На рис. 5.9, а показан зенкер малого диаметра с рабочей частью из твердого сплава, соединенный с хвостовиком пайкой встык. Здесь забор-

ный конус зенкера является частью конического центра с углом $2\varphi = 75^\circ$. Число зубьев $z = 3$, форма профиля канавок и зубьев прямолинейная.

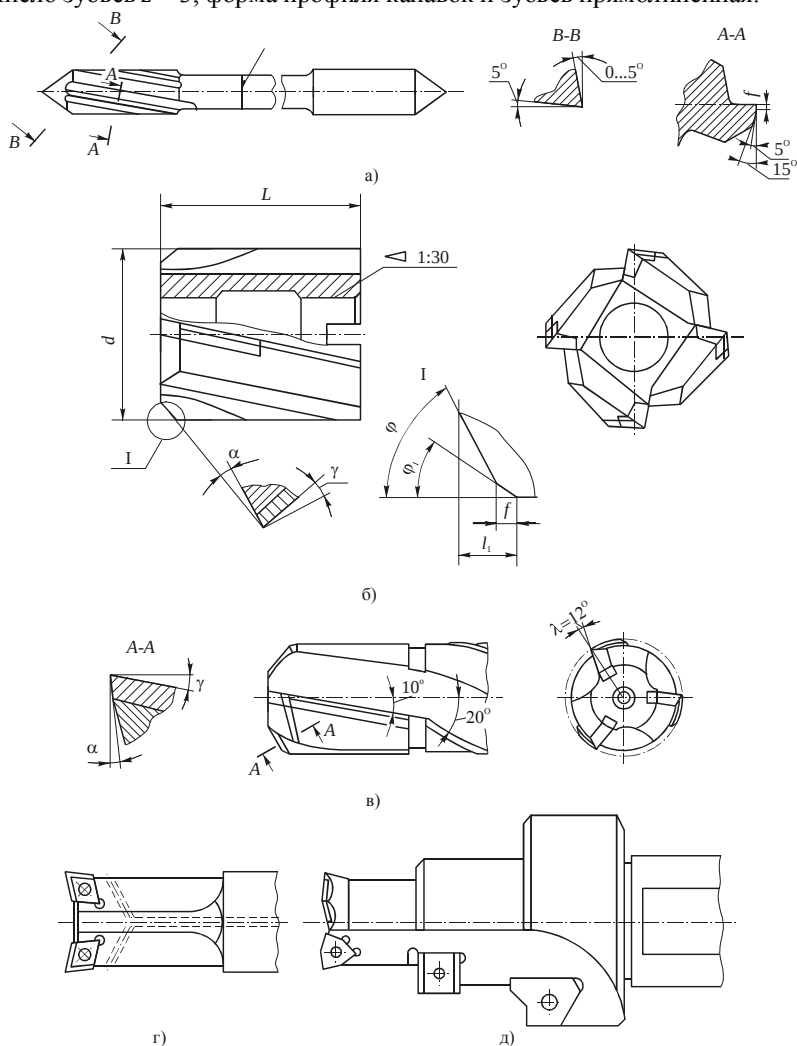


Рис.5.9. Твердосплавные зенкеры: а – цельный; б – насадной, с напайными твердосплавными пластинами; в – хвостовой, с напайными твердосплавными пластинами; г – с механическим креплением твердосплавных пластин и внутренним охлаждением; д – комбинированный зенкер-сверло

Следует отметить, что стоимость цельных твердосплавных зенкеров довольно высокая. Намного дешевле применение твердого сплава в виде напайных пластин стандартной формы, которые напавляют либо на ножи сборных инструментов (рис. 5.8, *а*), либо непосредственно на корпус насадных или хвостовых зенкеров (рис. 5.9, *б, в*).

У насадных твердосплавных зенкеров (рис. 5.9, *б*) с целью упрочнения наиболее уязвимых стыков главных и вспомогательных режущих кромок по уголкам затачивают фаски шириной $f = 0,5 \dots 0,8$ мм под углом $\varphi_1 = 30^\circ$ при $\varphi = 60^\circ$. Смещение пластин под углом $\lambda = 10 \dots 15^\circ$ (рис. 5.6) также способствует упрочнению режущих пластин. Такие зенкеры имеют достаточно большие размеры ($d = 34 \dots 80$ мм).

Наибольший удельный вес в машиностроении составляет обработка отверстий диаметром менее 20 мм. В этом случае используют хвостовые зенкеры (рис. 5.9, *в*) с напайкой пластин непосредственно на корпус инструментов ($d = 12 \dots 35$ мм, $z = 3$). Здесь с целью облегчения заточки пластин стружечная канавка по длине пластины имеет наклон под углом $\omega_1 = 10^\circ$ с последующим плавным переходом в винтовую канавку под углом $\omega = 20^\circ$. Для повышения прочности режущих кромок доводкой по передней поверхности снимают узкие фаски шириной $0,02 \dots 0,05$ мм под углом $\gamma_\phi = 0 \dots -15^\circ$.

При обработке закаленных сталей и особо прочных чугунов стружечные канавки у зенкеров выполняют прямыми.

В последние годы широко используются зенкеры с механическим креплением неперетачиваемых твердосплавных пластин (рис. 5.9, *г*). Такие зенкеры позволяют снимать большие припуски. У них пластины, как правило, крепят винтами, что позволяет получать инструменты компактных конструкций. Часто они изготавливаются как комбинированные инструменты (рис. 5.9, *д*), позволяющие производить сверление и зенкерование различных по форме поверхностей, в том числе и торцевых фасок.

5.2. 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.

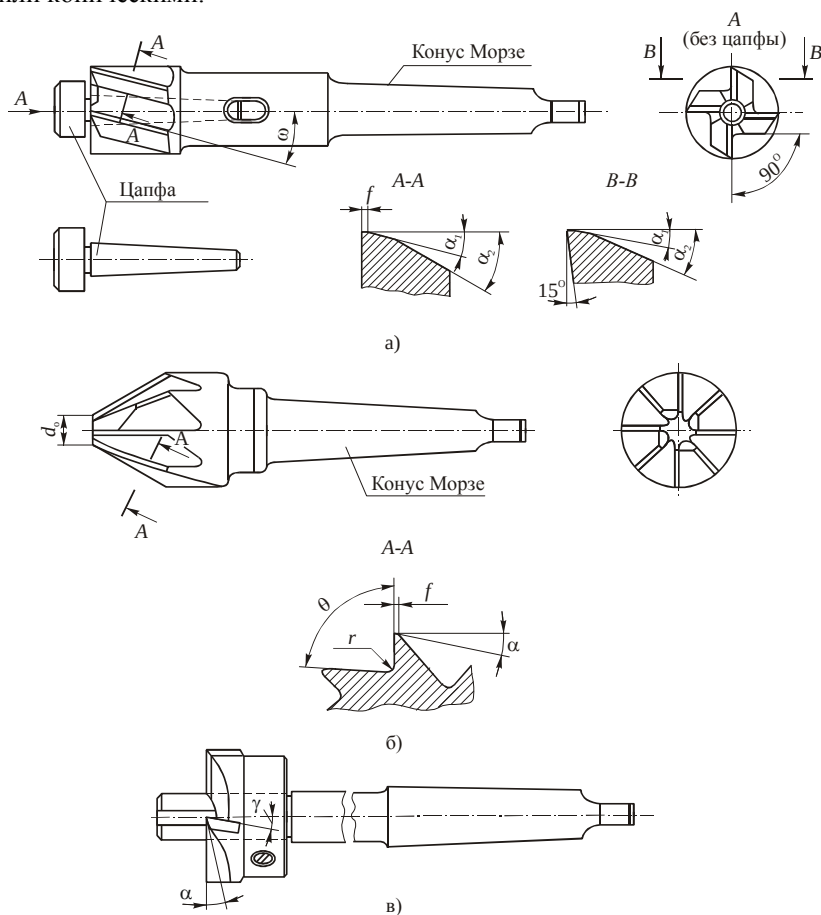


Рис. 5.10. Зенковки: а – для цилиндрических углублений; б – для конических углублений; в – для подрезки торцов

На рис. 5.10, а показана зенковка со сменной цапфой, имеющая винтовые стружечные канавки ($z = 4$) и применяемая для обработки цилиндрических углублений. Главные режущие кромки располагаются на торце, вспомогательные – на цилиндре. Задние поверхности – двухплоскостные с двойным задним углом $\alpha_1 = 8^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$, передний угол $\gamma = \omega = 15^\circ$. Зубья затачиваются доостра. На вспомогательных режущих кромках затачивается ленточка шириной $f = 0,3$ мм и двойной задний угол $\alpha_1 = 8^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$.

У зенковок для конических углублений (рис. 5.10, б) главные режущие кромки расположены на конической поверхности, а плоские передние поверхности расположены под углом $\gamma = 0^\circ$. В зависимости от диаметра ($d = 12 \dots 60$ мм) число зубьев $z = 4 \dots 12$, а угол при вершине выбирается соответственно форме углубления и чаще всего берется равным $2\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 120^\circ$. Диаметр зенковки на торце $d_0 = (0,15 \dots 0,18)d$, угол впадины между зубьями $\theta = 90 \dots 75^\circ$. Режущая кромка затачивается доостра или с оставлением узкой ленточки шириной $f = 0,03 \dots 0,05$ мм и заднего угла $\alpha = 12^\circ$.

Зенковки для подрезки торцевых поверхностей (иногда в литературе такие зенковки называют цековками) имеют режущие кромки только на торце. Вспомогательные кромки у них отсутствуют (рис. 5.10, в). Зенковки изготавливают хвостовыми или насадными. Для обработки чугунов зубья зенковок оснащают напайными твердосплавными пластинами. Направляющие цапфы изготавливают сменными или заодно целое с корпусом инструмента. Диаметры зенковок $d = 14 \dots 40$ мм. Из-за тяжелых условий работы число зубьев у зенковок четное и равно $2 \dots 4$. Для отвода стружки предусмотрены канавки в форме углублений на торце цилиндрической части. В целях облегчения работы зенковок, имеющих большую длину режущих кромок, рекомендуется на режущих кромках выполнять стружкоделительные канавки, расположенные на зубьях в шахматном порядке.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные типы зенкеров и области их применения.
2. Конструктивные и геометрические параметры цилиндрических зенкеров. Как определить допуски на наружный диаметр зенкера?
3. Особенности и разновидности сборных зенкеров.
4. Чем зенковки отличаются от цилиндрических зенкеров? Их разновидности и области применения.

6. РАЗВЕРТКИ

Развертки – это осевые многолезвийные режущие инструменты, применяемые для чистовой обработки отверстий. Точность отверстий после развертывания составляет $IT8...IT6$, а шероховатость поверхности – $Ra1,25...0,32$ 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 ($z = 6...14$) и, как следствие, лучшее направление в отверстии. Они снимают значительно меньший припуск ($t = 0,15...0,50$ мм), чем при зенкеровании. С целью достижения минимальной шероховатости поверхности развертки при обработке сталей работают на низких скоростях резания ($v = 4...12$ м/мин), т.е. до области появления нароста. Тем не менее благодаря большому числу зубьев производительность при развертывании достаточно высока, так как машинное время уменьшается за счет увеличения числа зубьев:

$$t_m = L_o / s_z z n,$$

где L_o – длина обрабатываемого отверстия, мм; s_z – подача на зуб, мм; z – число зубьев; n – частота вращения развертки (заготовки), мин^{-1} .

Для получения высокой точности отверстий развертки изготавливают с более жесткими допусками, чем зенкеры, а отверстия под развертывание получают сверлением, зенкерованием или растачиванием. Развертывание непосредственно после сверления используют только при обработке отверстий небольших диаметров (менее 3 мм).

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. 6.1, а) обрабатывают отверстия путем вращения инструмента вручную воротком, в который вставляется квадрат цилиндрического хвостовика. Эти развертки ($d = 3 \dots 40$ мм) изготавливают из инструментальной стали марки 9ХС. Для лучшего направления развертки в отверстию у нее затачивают большой длины заборный конус и калибрующую часть. В остальном конструкция ручных разверток не отличается от машинных.

Машинные концевые и насадные развертки цельные и сборные (рис. 6.1, б, в, г) применяют для обработки отверстий на сверлильных, токарных, револьверных, координатно-расточных и других станках. Хвостовики машинных разверток бывают цилиндрические ($d = 1 \dots 9$ мм) и конические ($d = 10 \dots 32$ 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.

6.1. Развертки цилиндрические.

Конструктивные и геометрические параметры

Рабочая часть цилиндрических разверток (рис. 6.1) состоит из режущей и калибрующей частей. На левом торце развертки снимается фаска под углом $\varphi = 45^\circ$, которая облегчает вхождение инструмента в отверстие и предохраняет режущие кромки от повреждения. Далее следует **заборный конус** с углом в плане φ , зубья на котором снимают припуск, заданный на обработку. Фаска и заборный конус составляют **режущую часть** развертки. Для улучшения условий работы развертки при врезании наименьший диаметр заборного конуса берется несколько меньше диаметра отверстия под развертывание.

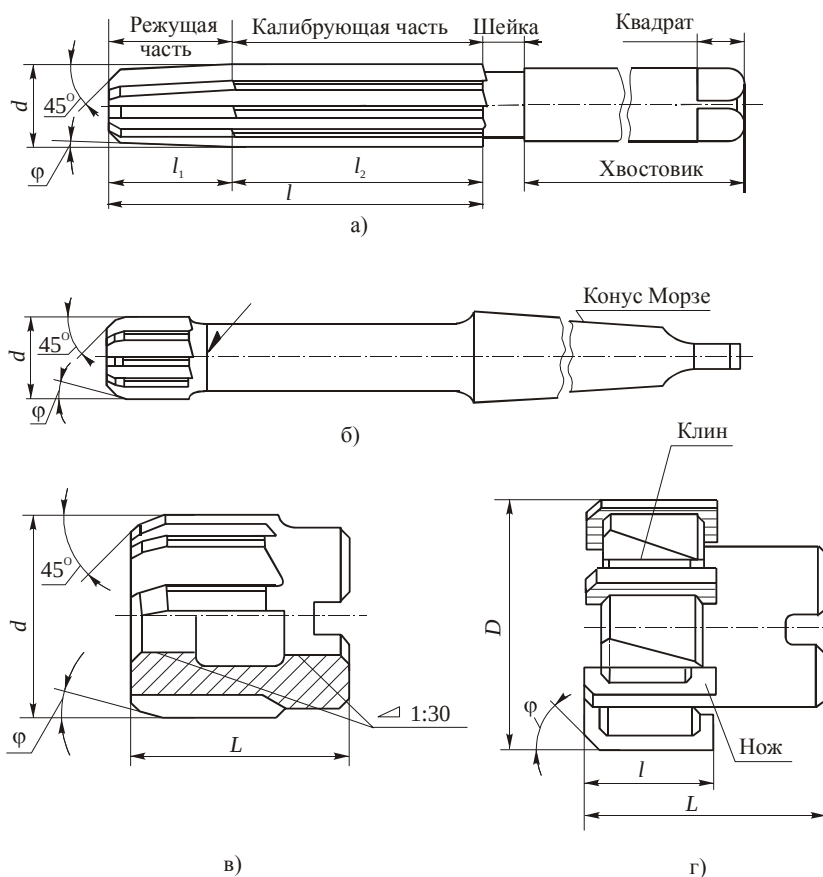


Рис. 6.1. Типы цилиндрических разверток: а – ручная; б – машинная; в – насадная; г – сборная

Угол в плане ϕ заборного конуса оказывает большое влияние на условия работы развертки, так как он определяет соотношение между шириной b и толщиной t слоя, срезаемого каждым зубом. Из рис. 6.2 следует, что $b = t / \sin \phi$; $a = s_z \sin \phi$.

Угол ϕ также определяет усилие подачи, поскольку

$$P_x = R_{xy} \sin \phi,$$

где R_{xy} – равнодействующая радиальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания.

С уменьшением угла φ сила подачи уменьшается и обеспечиваются плавный вход и выход развертки из отверстия. По этим причинам у ручных разверток угол φ принимается равным $1 \dots 2^\circ$. У машинных разверток при обработке сталей $\varphi = 12 \dots 15^\circ$, чугуна $\varphi = 3 \dots 5^\circ$, а при обработке глухих отверстий $\varphi = 45^\circ$.

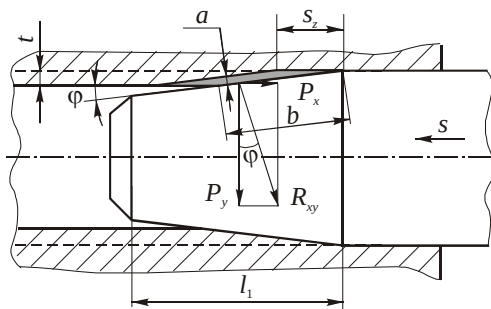


Рис. 6.2. Радиальная P_y и осевая P_x составляющие силы резания и параметры сечения срезаемого слоя при развертывании

Длина заборного конуса развертки

$$\ell_1 = (1,3 \dots 1,4) t \operatorname{ctg} \varphi.$$

Калибрующая часть развертки примерно до половины ее длины ℓ_2 цилиндрическая. На остальной части она затачивается с небольшой обратной конусностью, т.е. с уменьшением диаметра по направлению к хвостовику развертки. У ручных разверток величина обратной конусности на 100 мм длины равна $0,01 \dots 0,05$ мм, у машинных разверток: при жестком креплении инструмента – $0,04 \dots 0,06$ мм; при плавающем креплении в патроне – $0,08 \dots 0,015$ мм. Обратная конусность необходима для уменьшения разбивки отверстия при выходе из него развертки. Так как ее величина мала, то при небольшой длине калибрующей части обратную конусность иногда делают сразу за заборным конусом, не оставляя цилиндрического участка. Общая длина рабочей части разверток равна: у ручных разверток $\ell = (4 \dots 10)d$, у машинных $\ell = (0,75 \dots 2,0)d$.

При обработке отверстий высокой точности необходимо обращать особое внимание на радиальное биение зубьев разверток относительно

их оси. Оно замеряется в начале калибрующей части и должно быть не более $0,01 \dots 0,02$ мм.

Число зубьев разверток выбирается в зависимости от диаметра d инструмента. Так, например:

$z = 1,5\sqrt{d} + (2 \dots 4)$ – у цельных разверток;

$z = 1,2\sqrt{d}$ – у сборных разверток.

С целью облегчения измерения диаметра развертки расчетное значение z округляется до ближайшего целого четного числа. Причем у сборных разверток в связи с необходимостью размещения элементов крепления ножей число зубьев уменьшается.

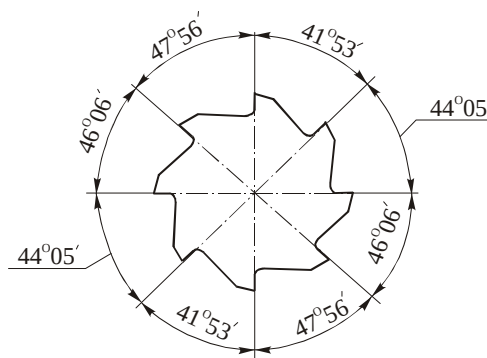


Рис. 6.3. Расположение зубьев развертки ($z=8$) по окружности (ГОСТ 7722–77)

Для снижения огранки и шероховатости поверхности обработанного отверстия расположение зубьев по наружной окружности развертки рекомендуется делать с переменным шагом (рис. 6.3). Причем для удобства измерения диаметра развертки накрест расположенные углы берут равными, чтобы режущие кромки противоположных зубьев лежали в диаметральной плоскости.

Кроме значений угловых шагов, указанных на рис. 6.3, возможны и другие их величины, зависящие от диаметра и числа зубьев развертки.

Стружечные канавки у разверток чаще всего прямые, а зубья изготавливают с передним углом $\gamma = 0$. При обработке вязких материалов во избежание налипов стружки и вырывов на обработанной поверхности зубья затачивают с положительными углами $\gamma = 5 \dots 10^\circ$.

Задний угол, равный $\alpha = 5 \dots 12^\circ$, получают заточкой задних поверхностей развертки по плоскости. Причем, в отличие от других видов ин-

струментов, меньшее значение этого угла рекомендуется брать при чистовой обработке, а большее – при черновой.

Зубья на заборном конусе затачивают доостра, а на калибрующей части у них оставляют узкие цилиндрические направляющие ленточки шириной 0,08...0,40 мм для $d = 3...50$ мм. Их тщательно доводят, благодаря чему обеспечивается выглаживание микронеровностей обработанной поверхности и предотвращается налипание мелкой стружки, ухудшающей шероховатость поверхности отверстий и снижающей стойкость разверток.

Профиль канавок между зубьями разверток формируется одно- или двухугловыми фрезами с углом $\theta = 65...110^\circ$ (рис. 6.4, а, б). Для средних и крупных разверток с целью лучшего размещения стружки в канавках применяется профиль с вогнутой спинкой (рис. 6.4, в). Неравномерность углового шага между зубьями обеспечивается путем изменения глубины канавок при фрезеровании, что достигается специальной настройкой станка. У сборных разверток неравномерность углового шага зубьев создается за счет небольшого изменения направления пазов под ножи относительно оси развертки.

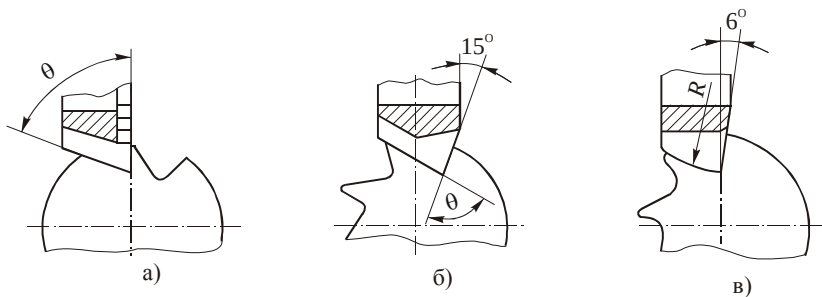


Рис. 6.4. Профили стружечных канавок разверток: а, б – с прямолинейной спинкой; в – с вогнутой спинкой

У разверток, предназначенных для обработки отверстий с продольными пазами или прерывистой обрабатываемой поверхностью, делают винтовые канавки с углом наклона ω , равным: при обработке сталей $\omega = 12...20^\circ$, чугунов – $\omega = 7...8^\circ$, легких сплавов – $\omega = 30...45^\circ$. Так как при снятии тонких срезов возможно появление отрицательного значения силы подачи, то во избежание самозатягивания и заедания развертки в отверстии направление винтовых канавок инструмента должно быть обрат-

ным направлением вращения развертки, т.е. левое при правом вращении и наоборот. При этом шероховатость обработанной поверхности уменьшается, а усилие подачи возрастает. У ручных разверток допускается совпадение направления винтовых канавок с направлением вращения, так как они работают с малой подачей.

Крепление разверток на станке должно обеспечивать совпадение осей развертки, кондукторной втулки и обрабатываемого отверстия. При жестком креплении развертки в шпинделе станка все погрешности вращения (биение, разбивка и т.п.) переносятся на деталь. Лучшие результаты достигаются при креплении разверток в плавающие патроны. Существует множество конструкций таких патронов. Наибольшую точность обеспечивают патроны, допускающие не только качение развертки в двух плоскостях, но и смещение, параллельное оси вращения заготовки. При этом величины перемещения развертки должны быть небольшими, так как в противном случае при выходе развертки из отверстия увеличивается разбивка последнего.

Для получения особо точных размеров и высокой прямолинейности оси отверстий применяют также принудительное направление разверток с помощью гладких цилиндрических направляющих, устанавливаемых впереди или сзади их рабочей части. В последнем случае при использовании кондукторных втулок за счет уменьшения трения ленточек по закаленной поверхности втулок стойкость разверток повышается. При этом диаметры направляющих должны быть больше диаметров разверток.

Допуски на диаметр развертки в связи с тем, что развертки являются чистовым инструментом, обеспечивающим высокую точность по диаметру (*ЛТ8...ЛТ6*), должны быть очень малыми, примерно в 3 раза меньшими, чем допуски на обрабатываемое отверстие.

При назначении допусков на диаметр развертки необходимо стремиться к тому, чтобы: 1) обеспечить размер отверстия детали в пределах допуска δ_A ; 2) допуск на изготовление развертки δ_p должен быть не очень узким, так как в этом случае резко возрастает стоимость ее изготовления; 3) для повышения стойкости развертки необходимо предусмотреть допуск на износ (переточку) δ_n развертки.

Таким образом, необходимо установить верхнее и нижнее отклонения для новой и нижнее – для изношенной разверток. При этом нужно учитывать возможность появления максимальной и минимальной разбивки отверстия, которая может быть положительной или отрицательной.

При положительной разбивке диаметр отверстия после вывода развертки становится больше ее диаметра. Основные причины такой разбивки: 1) несовпадение осей вращения развертки и обрабатываемого отверстия; 2) биение режущих кромок; 3) нарост и мелкая стружка на направляющих ленточках и др.

Отрицательная разбивка проявляется в уменьшении диаметра отверстия после вывода развертки. Она встречается реже и имеет место при обработке тонкостенных заготовок, развертывании отверстий в цветных металлах вследствие упругих деформаций поверхностей отверстий, а также при работе твердосплавных разверток по закаленным сталям из-за высокой температуры резания и термических деформаций детали.

На рис. 6.5, а, б показано расположение полей допусков на развертку и обрабатываемое отверстие при обоих видах разбивки.

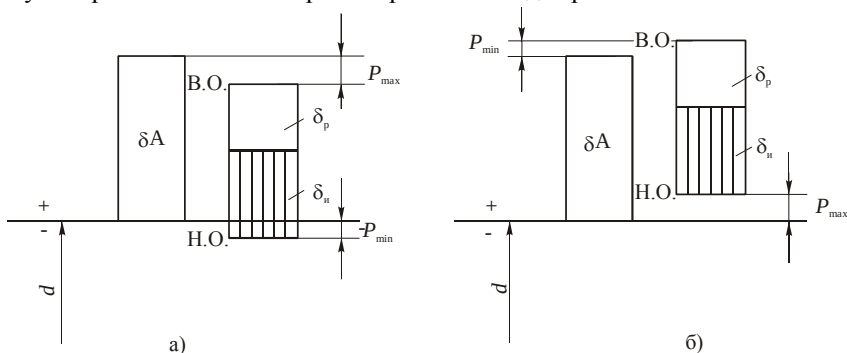


Рис. 6.5. Схемы расположения полей допусков на диаметр развертки и отверстия: а – при положительной разбивке отверстия; б – при отрицательной разбивке отверстия

При положительной разбивке (рис. 6.5, а) допустимое верхнее отклонение допуска на развертку $В.О. = \delta A - P_{\max}$, нижнее отклонение у изношенной развертки $Н.О. = -P_{\min}$. При отрицательной разбивке (рис. 6.5, б) $В.О. = \delta A + P_{\min}$, $Н.О. = P_{\max}$. Такое же соотношение положений полей допусков на отверстие и развертку сохраняется и для случаев обработки отверстия в системе вала. Значения $P_{\max}$ и $P_{\min}$ определяются экспериментально. В случае положительной разбивки ориентировочно можно принять $P_{\max} \cong \delta_p = 1/3\delta A$, а запас на износ $\delta_n \cong (0,45...0,60)\delta A$ (здесь δA берется для отверстий по *ИТ 5... ИТ 8*).

6.2. Особенности конструкций других типов разверток

В ремонтном деле применяются цилиндрические **ручные развертки, регулируемые по диаметру**. Одна из конструкций такой развертки приведена на рис. 6.6, а. В корпусе 3 развертки, изготовленном из стали 9ХС, имеется отверстие, состоящее из конической и цилиндрической частей, в которое помещается шарик 2, передвигаемый регулировочным винтом 1 вдоль оси. Между зубьями по впадине сделаны продольные прорезы. 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 $d = 10 \dots 20$ мм $\Delta = 0,25$ мм, для $d = 20 \dots 30$ мм $\Delta = 0,4$ мм, для $d = 30 \dots 50$ мм $\Delta = 0,5$ мм.

Машинные развертки, изготавливаемые насадными сборными (рис. 6.6, б), можно регулировать по диаметру за счет перестановки ножей по rifлениям. Более тонкую регулировку можно осуществить путем перемещения ножей с rifлениями 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.

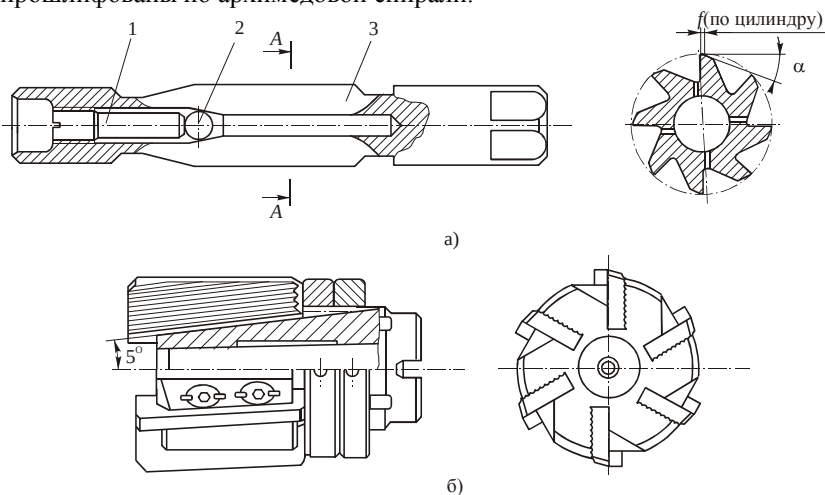


Рис. 6.6. Развертки, регулируемые по диаметру:
а – ручная; б – машинная, насадная, сборная

Есть и другие конструкции сборных разверток. При их эксплуатации следует иметь в виду, что после каждой регулировки необходимы шлифовка и доводка развертки по диаметру, так как из-за жестких требований к точности разверток ее невозможно обеспечить только регулировкой.

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

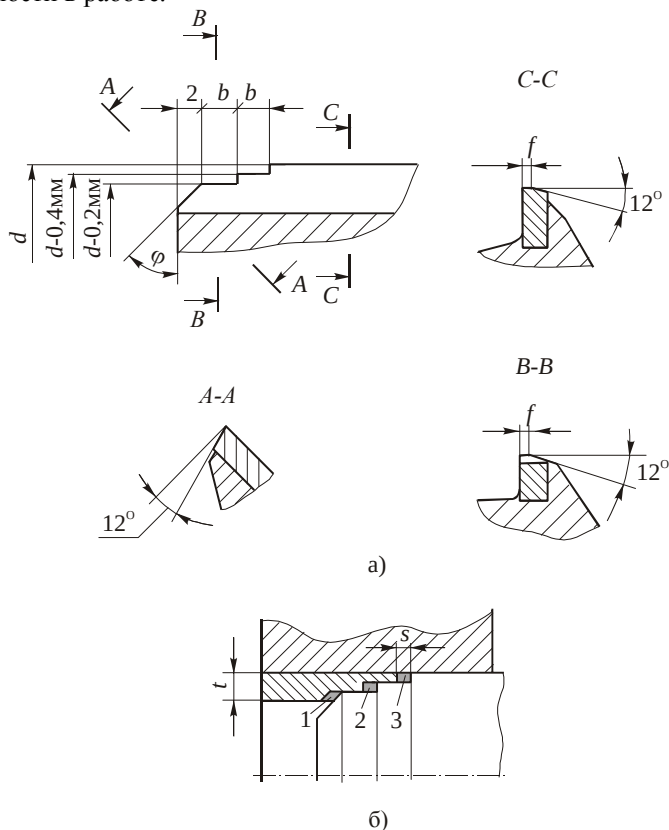


Рис. 6.7. Развертка с кольцевой заточкой

Режущая часть таких разверток (рис. 6.7, а) не имеет заборного конуса, а состоит из трех участков. В начале 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 $b = 2...4$ мм (в зависимости от размера развертки) и диаметром на $0,2...0,4$ 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. В этом случае ориентировочно $z = 1,5\sqrt{d}$ с последующим округлением до ближайшего четного числа. Расположение зубьев по окружности равномерное. Стружечные канавки прямые, но для обработки прерывистых поверхностей применяют винтовые канавки с направлением, обратным вращению развертки.

Благодаря тому, что главные режущие кромки расположены перпендикулярно к оси развертки (рис. 6.7, 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 – $Ra1,25...0,63$ 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. 6.8) 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.

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

зенкерования. При этом обрабатываемые материалы, как правило, вязкие и пластичные.

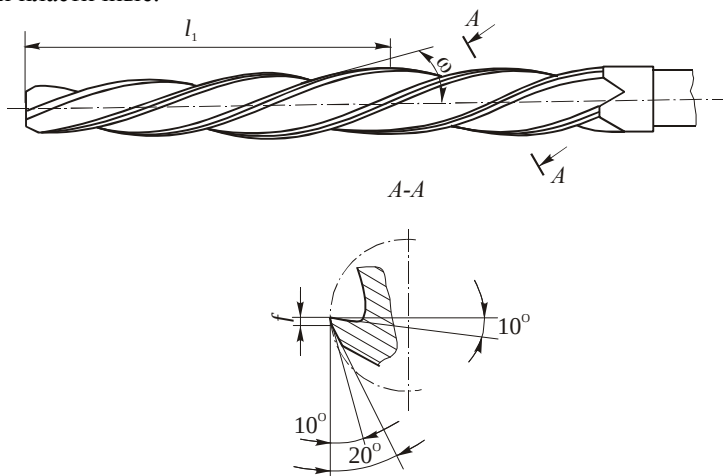


Рис. 6.8. Котельная развертка

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

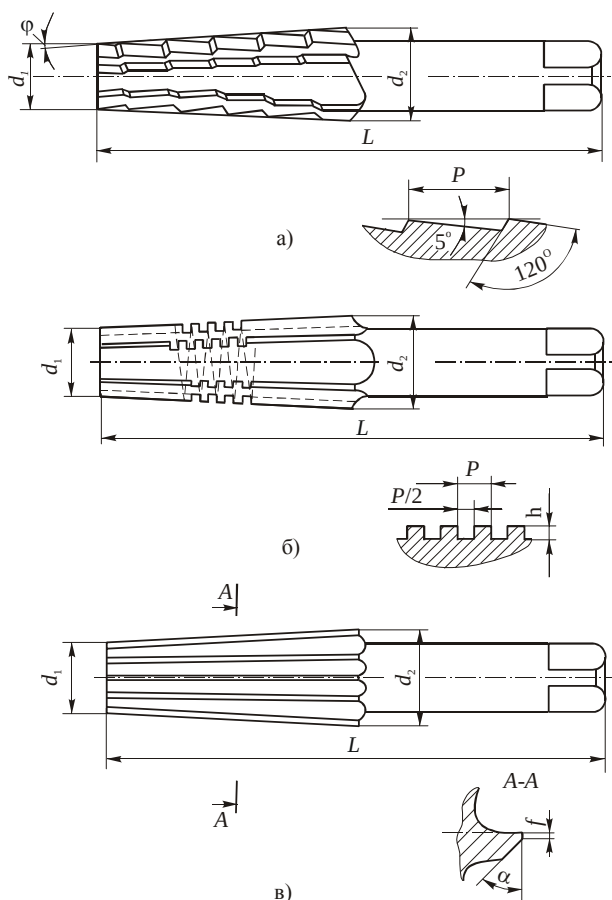


Рис. 6.9. Комплект конических разверток: а – черновая (№ 1); б – промежуточная (№ 2); в – чистовая (№ 3)

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

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. 6.10, *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.

На рис. 6.10, *б* приведена конструкция развертки с цельной твердосплавной рабочей частью и стальным хвостовиком, соединенным пайкой. Такие развертки изготавливают диаметрами 3...12 мм.

На рис. 6.10, *в* показана концевая развертка с твердосплавными пластинками, напаянными на корпус, а на рис. 6.10, *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 обеспечи-

вайт повышение стойкости твердосплавных пластин за счет отсутствия термических напряжений.

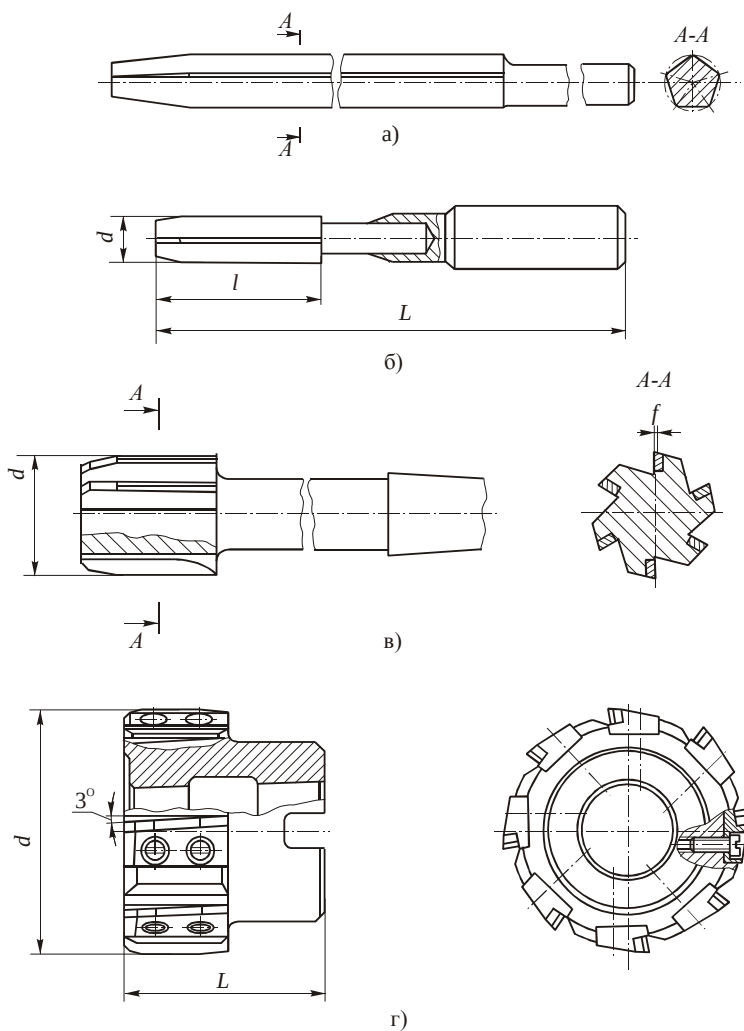


Рис. 6.10. Твердосплавные развертки: *а* – гранная цельная; *б* – с цельной твердосплавной рабочей частью, припаянной к хвостовику; *в* – хвостовая, с напайными твердосплавными пластинами; *г* – насадная, сборная, с ножами, оснащенными твердым сплавом

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. 6.11. За счет применения внутреннего напорного охлаждения СОЖ на масляной основе удалось достичь при обработке сталей следующих режимов резания: $v = 70 \dots 90$ мм, $s = 0,1 \dots 0,5$ мм/об, $t = 0,15$ мм.

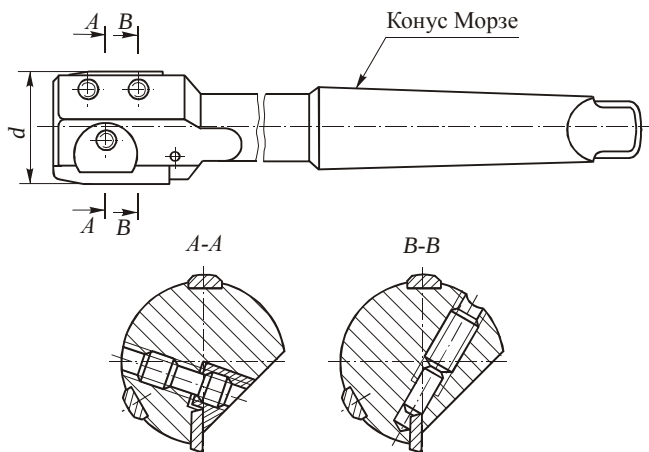


Рис. 6.11. Твердосплавная развертка одностороннего резания

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 $\gamma_\phi = -5^\circ$; г) обратный конус из-за малой длины калибрующей части обычно не делают, его заменяют закруглением по радиусу.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Основные конструктивные и геометрические параметры разверток. Как они назначаются?
2. Как определяют допуски на диаметр разверток?
3. В чем суть кольцевой заточки цилиндрических разверток? Ее достоинства.
4. Особенности конструкции котельных разверток. Где они применяются?
5. Особенности конструкции разверток для обработки конических отверстий.
6. Особенности конструкций разверток, оснащенных твердым сплавом.
7. Развертки одностороннего резания. Их достоинства и недостатки.

7. РАСТОЧНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

7.1. Расточные инструменты

Расточные инструменты применяются для увеличения диаметров отверстий и являются широко универсальными инструментами, так как, в отличие от зенкеров, разверток и других инструментов, допускают регулировку (настройку) режущих кромок в радиальном направлении.

Расточными инструментами обрабатывают отверстия диаметром 1...1000 мм и более с точностью $IT\ 5...IT\ 6$ и шероховатостью $Ra\ 0,8...1,6$ мкм.

В механообработке нашли применение следующие типы расточных инструментов: 1) стержневые резцы; 2) двухсторонние пластинчатые резцы-блоки; 3) расточные головки для обработки неглубоких отверстий; 4) расточные головки для обработки глубоких отверстий.

Стержневые резцы имеют одну режущую кромку из быстрорежущей стали или в виде СМП из твердого сплава или СТМ.

Державки стержневых резцов в поперечном сечении имеют круглую, квадратную или прямоугольную формы. Наиболее простой и распространенный способ закрепления резца с державкой квадратной или круглой форм показан на рис. 7.1, *а*. Здесь резец 2 закреплен винтом 3 в оправке 1. Вылет резца регулируется винтом 4.

Для растачивания точных отверстий диаметром более 20 мм широкое распространение получили вставки типа «Microbohr» (рис. 7.1, *б*). На цилиндрической поверхности резца 5 имеется точная резьба с шагом $P = 0,5$ мм. Регулировочная гайка 4 с внутренней резьбой и градуированной шкалой базируется своей конусной поверхностью в оправке 1. В нужном положении резец закрепляется винтом 3 с шайбой 2. Поворот гайки на одно деление перемещает вершину резца в радиальном направлении (с учетом угла наклона продольной оси резца) на 0,01 мм. Резец оснащен напайной твердосплавной пластиной или СМП из твердого сплава.

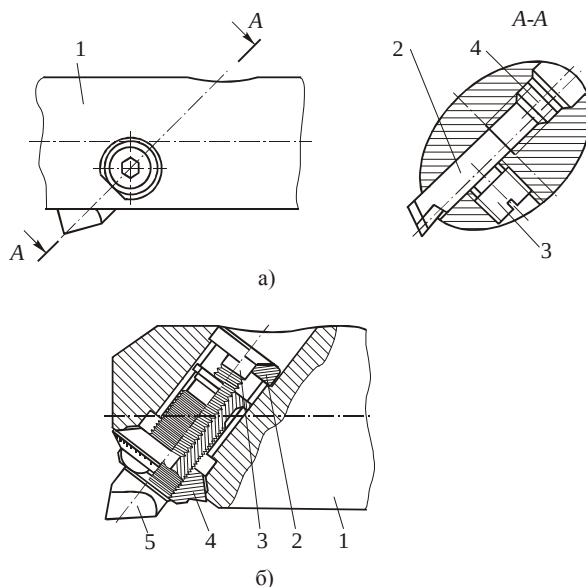


Рис. 7.1. Расточные стержневые резцы: *а* – регулируемый; *б* – с микрорегулированием

Двухсторонние пластинчатые резцы-блоки применяют для предварительного и окончательного растачивания отверстий диаметром более 25 мм. По сравнению с однолезвийными инструментами они обладают большей производительностью, обеспечивают большую точность и низкую шероховатость поверхности отверстий.

Резцы-блоки изготавливают или целиком из быстрорежущей стали, или оснащают пластинами из твердого сплава, а для увеличения стойкости изготавливают сборными и регулируемыми по диаметру.

Крепление пластинчатых расточных резцов в оправках либо осуществляется неподвижно $d = 50 \dots 150$ мм (рис. 7.2, *а*), либо допускают «плавание» по одной оси (двухлезвийные блоки (рис. 7.2, *б*, *в*)). Выпадению резца-блока 1 из борштанги 2 препятствует винт 3, входящий с зазором в отверстие, выполненное в корпусе резца-блока (рис. 7.2, *б*). Известны конструкции четырех и более лезвийных блоков, «плавающих» с помощью крестовины по двум взаимно перпендикулярным осям [5].

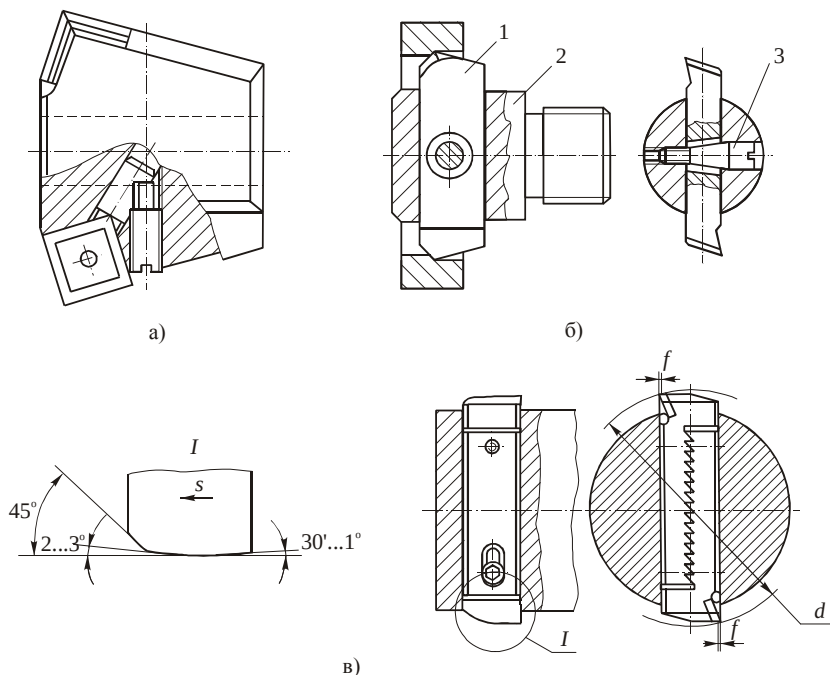


Рис. 7.2. Двухсторонние расточные резцы-блоки: *а* – неподвижный; *б* – «плавающий», нерегулируемый по диаметру; *в* – «плавающий», составной, регулируемый по диаметру

«Плавающее» крепление резцов-блоков $d = 25 \dots 600$ мм применяется для компенсации углового и линейного несовпадения осей обрабатываемых отверстий и инструмента. Указанное несовпадение осей происходит из-за погрешностей установки заготовки (инструмента) и зажимных патронов, деформаций элементов технологической системы и других факторов и приводит к снижению точности обработки и стойкости инструмента.

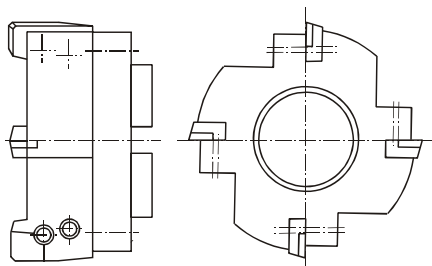


Рис. 7.3. Расточная головка ($d = 120 \dots 300$ мм, $z = 4 \dots 8$)

Расточные головки для обработки неглубоких отверстий имеют несколько режущих кромок (рис. 7.3). Они жестко крепятся в оправке и применяются для предварительной

обработки отверстий.

При конструировании многокромочных расточных головок нашли применение две схемы резания: 1) деления глубины резания; 2) деления подачи.

При **схеме деления глубины резания** заданная глубина t последовательно срезается каждым резцом головки (рис. 7.4, а):

$$t = t_1 + t_2 + \dots + t_n \quad (z=1, 2, \dots, n), \quad (7.1)$$

где n – номер резца.

При этом подача s_{z_n} , приходящаяся на каждое лезвие инструмента, равна подаче s на оборот инструмента или заготовки:

$$s = s_{z_1} = s_{z_2} = \dots = s_{z_n}.$$

Расточные головки, работающие по схеме деления глубины резания, применяются для удаления больших припусков и имеют относительно низкую производительность.

При работе по **схеме деления подачи** каждая режущая кромка головки снимает полную глубину резания t , а подача s на один оборот инструмента или заготовки равна сумме подач, приходящихся на каждый зуб (рис. 7.4, б):

$$s = s_{z_1} + s_{z_2} + \dots + s_{z_n}. \quad (7.2)$$

Таким образом, расточные головки, работающие по схеме деления подачи, развивают значительно большую производительность, чем головки, работающие по схеме деления глубины резания.

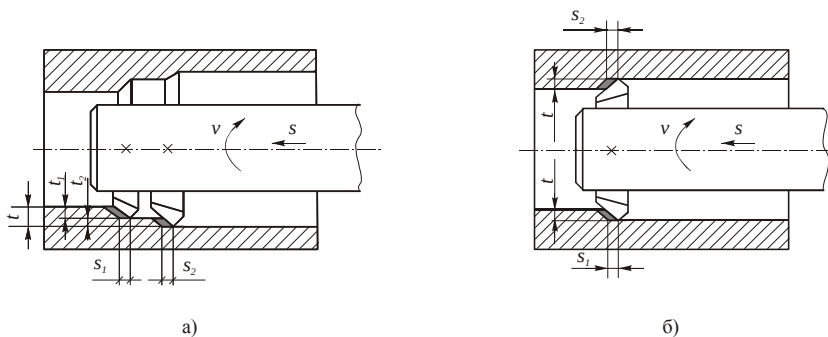


Рис. 7.4. Схемы резания, применяемые при обработке отверстий многолезвийными расточными головками: а – деления глубины резания; б – деления подачи

Возможны два способа деления подачи между зубьями таких инструментов. При первом способе зубья располагаются равномерно по окружности, т.е. угловые шаги зубьев равны между собой:

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n,$$

тогда подача, приходящаяся на каждый зуб, равна

$$s_{z_n} = s / z \text{ (мм/зуб)}. \quad (7.3)$$

При втором способе деления подачи зубья расположены неравномерно по окружности, т.е. угловые шаги зубьев не равны между собой:

$$\omega_1 \neq \omega_2 \neq \dots \neq \omega_n.$$

Схема деления подачи двухлезвийным расточным блоком для второго способа показана на рис. 7.5, а. Здесь по горизонтали отложена развернутая длина окружности растачиваемого отверстия $\pi d = 360^\circ$. Зуб 1 врезается в торец заготовки в точке А, а зуб 2 – в точке В. Если инструмент (заготовка) имеет подачу s , мм/об, то зуб 1 при повороте на угол ω_1 пройдет в осевом направлении расстояние s_{z_1} , а зуб 2 при повороте на угол ω_2 – расстояние s_{z_2} .

Из подобия прямоугольных треугольников $\triangle ABC \sim \triangle ADF \sim \triangle BDE$ следует, что

$$\frac{360^\circ}{s} = \frac{\omega_1}{s_{z_1}} = \frac{\omega_2}{s_{z_2}}; \quad s_{z_n} = \frac{s\omega_n}{360^\circ}. \quad (7.4)$$

Таким образом, при неравномерном расположении зубьев подача s_{z_n} на зуб инструмента будет пропорциональна подаче s на оборот инструмента (заготовки) и углу ω_n зубьев. В этом случае нагрузка на зубья будет различной, что вызовет их неравномерный износ и, как следствие, снижение общей стойкости инструмента, а также точности диаметра обработанных отверстий, хотя точность формы отверстий будет выше.

Для увеличения стойкости инструмента и точности обработки необходимо обеспечить одинаковую нагрузку на зубья при сохранении их неравномерного расположения. Достигнуть этого можно за счет осевого смещения одних зубьев относительно других, например в случае двухлезвийного расточного блока (рис. 7.5, б) за счет осевого смещения на

величину Δh зуба 2 относительно зуба 1. Величину смещения Δh можно определить из подобия треугольников $\triangle ABC \sim \triangle ADF \sim \triangle BDE$:

$$\frac{360^\circ}{s} = \frac{\omega_1}{s/z - \Delta h} = \frac{\omega_2}{s/z - \Delta h};$$

$$\omega_n < \frac{360^\circ}{z}; \quad \Delta h = \left(\frac{1}{z} - \frac{\omega_n}{360^\circ} \right) s; \quad (7.5)$$

$$\omega_n > \frac{360^\circ}{z}; \quad \Delta h = \left(\frac{\omega_n}{360^\circ} - \frac{1}{z} \right) s. \quad (7.6)$$

Расточные головки, работающие по схеме деления подачи, за счет увеличения числа режущих кромок теоретически могут развивать любую производительность. Однако на практике обычно используют двух-трехрезцовые (для чистовой обработки) или четырех-восьмирезцовые (для предварительной обработки) расточные головки.

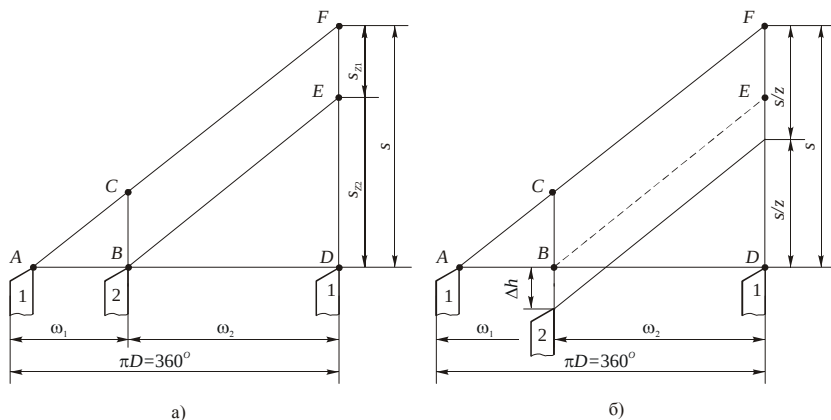


Рис. 7.5. Возможные варианты нагружения лезвий расточных головок при их неравномерном угловом шаге: а – различная нагрузка на лезвия; б – одинаковая нагрузка на лезвия

Расточные головки для обработки глубоких отверстий относятся к инструментам одностороннего резания с определенностью базирования.

На рис. 7.6 показана такая головка, предназначенная для растачивания глубоких отверстий диаметром 45...250 мм. Режущий элемент головки выполнен в виде кассеты 4 с продольной шпонкой, входящей в

соответствующий паз на корпусе 5 головки. Кассета крепится в корпусе винтом 7. На ней с помощью клина 6 закреплена твердосплавная пластина 1 ромбической формы, которая имеет две режущие кромки. Настройка головки на диаметр производится путем смены направляющих 2 и регулировки вылета кассеты. В процессе обработки три твердосплавные направляющие 2 под действием радиальных составляющих сил резания и трения прижимаются к поверхности обработанного отверстия, обеспечивая тем самым поперечную устойчивость инструмента. Три пластмассовые (из полиамида) направляющие 3 служат для гашения колебаний расточной головки.

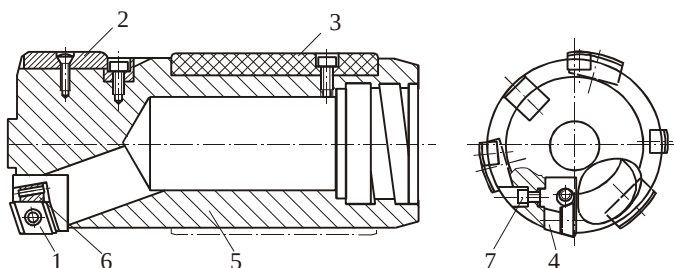


Рис. 7.6. Расточная головка фирмы «Botek» (Германия) для обработки глубоких отверстий: 1 – твердосплавная режущая пластина; 2 – твердосплавная направляющая; 3 – пластмассовая направляющая; 4 – кассета; 5 – корпус головки; 6 – клин; 7 – винт

На рис. 7.7 показана головка для растачивания гильз пневмо- и гидроцилиндров под последующую раскатку. Такая головка может работать по трем вариантам: 1) с внутренним подводом СОЖ и наружным отводом стружки (А); 2) с внутренним подводом СОЖ и внутренним отводом стружки с помощью эжектора (В); 3) с наружным подводом СОЖ и внутренним отводом стружки (В).

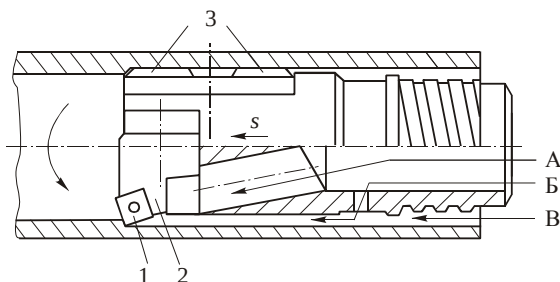


Рис. 7.7. Расточная головка фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция) для обработки гильз гидроцилиндров: А – с внутренним подводом СОЖ; В – с эжекторным отводом стружки; В – с наружным подводом СОЖ; 1 – твердосплавная режущая пластина; 2 – кассета; 3 – твердосплавная направляющая

В варианте *А* стружка отводится вперед, а в вариантах *Б* и *В* – назад и поэтому в процессе обработки отверстие должно быть заглушено.

Обработка отверстия такой головкой ведется в два этапа. На первом этапе производится растачивание отверстия. При этом стебель работает на сжатие, а твердосплавные направляющие 3 опираются на поверхность обработанного пластиной 1 отверстия. На втором этапе кассета 2 заменяется на другую, заранее настроенную на снятие припуска глубиной 0,2 мм. При этом направление подачи меняется на обратное, стебель работает на растяжение, а твердосплавные направляющие 3 опираются на поверхность обработанного отверстия, так как находятся впереди вершины СМП.

Фирмой «Sandvik Coromant» (Швеция) разработана также другая, еще более производительная конструкция инструмента для обработки отверстий диаметром 40...380 мм и глубиной до 4000 мм в гильзах пневмо- и гидроцилиндров. Этот комбинированный режущо-деформирующий инструмент работает следующим образом (рис. 7.8). При прямом ходе инструмента (рис. 7.8, *а*) осуществляется растачивание отверстия плавающим двухлезвийным расточным блоком 1, оснащенным твердым сплавом. При этом обойма роликового раскатника 2 сдвинута вправо на некоторое расстояние от опорного кольца 3, а ролики раскатника не касаются поверхности обработанного отверстия.

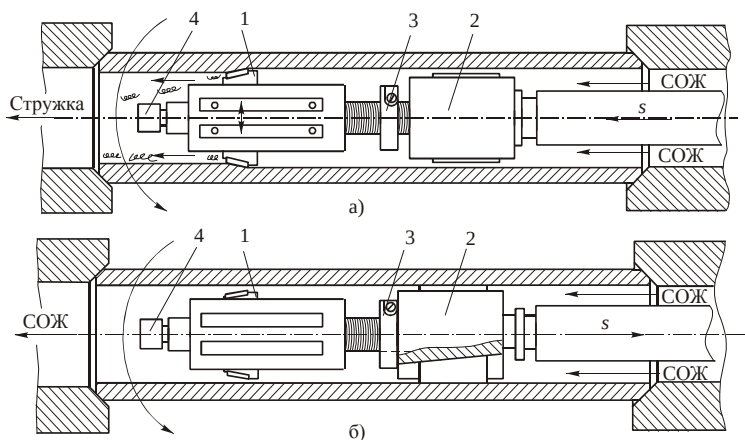


Рис. 7.8. Схемы обработки гильзы гидроцилиндра комбинированным режущо-деформирующим инструментом: 1 – плавающий двухлезвийный расточный блок; 2 – роликовый раскатник; 3 – опорное кольцо; 4 – нажимное устройство

После окончания растачивания резцы плавающего блока (рис. 7.8, б) 1 с помощью пневматического нажимного устройства 4 утапливаются. Затем включается обратная подача инструмента, обойма раскатника 2 отодвигается влево и упирается в опорное кольцо 3. Ролики начинают пластически деформировать поверхность обработанного отверстия. При этом шероховатость поверхности отверстия достигает $Ra\ 0,05 \dots 0,20$ мкм, а ее твердость в результате наклепа увеличивается на 50%. Обработка ведется с использованием СОЖ на масляной основе с противозадирными присадками (P, S, Cl).

7.2. Комбинированные режущие инструменты для обработки отверстий

Комбинированные инструменты – это соединение двух и более одно- или разнотипных инструментов, закрепленных на одном корпусе, которое позволяет за один проход совмещать несколько операций или переходов. Благодаря этому значительно сокращается машинное и вспомогательное время и повышается производительность процесса обработки отверстий. Эти инструменты применяются на сверлильных, револьверных, расточных, агрегатных станках, токарных автоматах, автоматических линиях и обрабатывающих центрах.

При обработке цилиндрических отверстий широко используются комбинированные инструменты, являющиеся соединениями инструментов разных типов: сверло – зенкер, сверло – метчик, сверло – развертка, зенкер – развертка и др.

При обработке ступенчатых отверстий применяются соединения однотипных инструментов: ступенчатые сверла, зенкеры, развертки и др. При этом значительно уменьшается отклонение от соосности ступеней и повышается точность размеров между торцами обработанных поверхностей. Число ступеней в таких инструментах может достигать до шести, а число объединенных элементарных инструментов – до пяти. Выбор числа ступеней определяется требованиями достижения наибольшей производительности, точности и низкой шероховатости обработанных отверстий. Диаметры промежуточных ступеней инструмента назначают в зависимости от вида ступеней, величины снимаемого припуска, а также от схемы распределения припуска между ступенями. Диаметр последней ступени рассчитывают с учетом допуска на диаметр обработанного отверстия, величины его разбивки или усадки и допуска на износ инструмента.

Число зубьев у комбинированных инструментов с целью удобства измерения при контроле диаметра принимается четным и берется в за-

висимости от припуска на обработку, условий отвода стружки и величин сил и крутящих моментов, действующих на инструмент.

Для обеспечения надежного отвода стружки увеличивают размеры и угол наклона стружечных канавок, применяют стружкодробящие устройства и внутреннее напорное охлаждение. При этом стружкоотводящие канавки каждой ступени должны плавно сопрягаться с канавкой последующей ступени, не создавая препятствий для отвода стружки.

Примеры комбинированных инструментов для обработки отверстий приведены на рис. 7.9, а также в разд. 11.

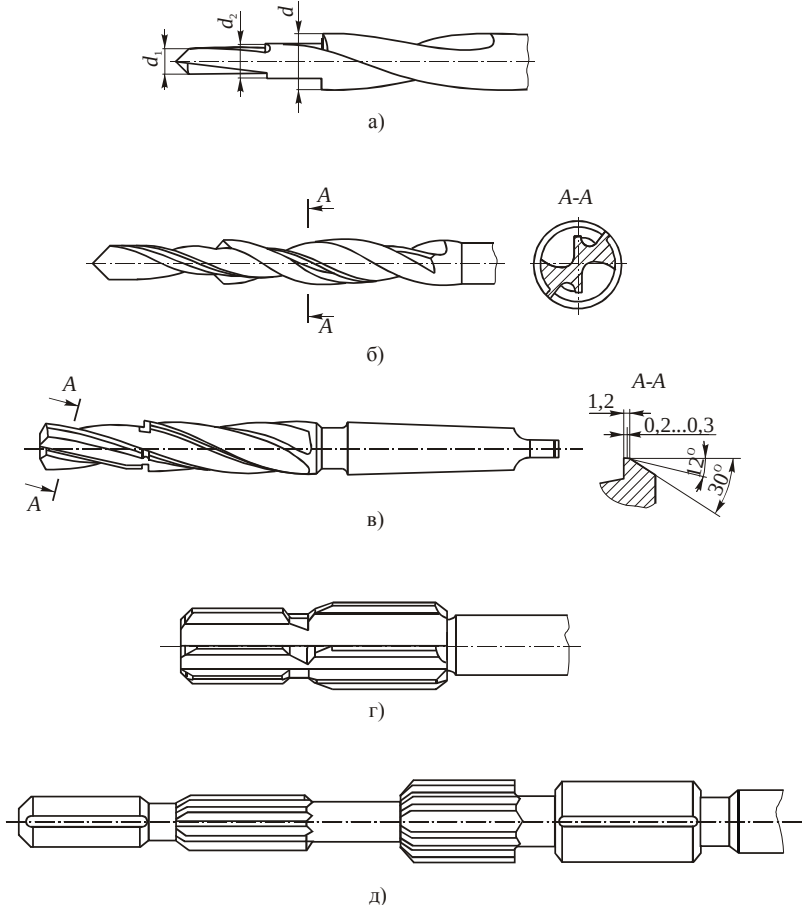


Рис. 7.9. Комбинированные (ступенчатые) инструменты для обработки отверстий:
а, б – сверла; в – зенкер; г, д – развертки

Ступенчатые сверла применяют в основном двух вариантов: 1) все ступенчато расположенные части разных диаметров сверла имеют одну общую канавку (рис. 7.9, *а*); 2) каждая из составляющих частей сверла имеет свои стружечные канавки по длине рабочей части инструмента (рис. 7.9, *б*). Из них сверла первого варианта значительно проще в изготовлении, чем сверла второго варианта, но имеют меньший запас на переточку.

Для надежного направления сверла при обработке отверстий с помощью кондукторной втулки длину сверла меньшего диаметра необходимо делать не более $3d_1$. Угол наклона стружечных канавок назначают по наибольшему диаметру сверла с учетом свойств обрабатываемого материала. Сверла $d = 3 \dots 10$ мм изготавливают с цилиндрическим хвостовиком, а $d > 6$ мм – с коническим хвостовиком.

Ступенчатый зенкер (рис. 7.9, *в*) должен иметь канавки, объем которых позволял бы надежно отводить стружку от обеих ступеней зенкера. С целью облегчения заточки ступенчатые зенкеры часто делают сборными. При этом первую ступень зенкера выполняют в виде отдельного зенкера, снабженного коническим хвостовиком, входящим в соответствующее коническое отверстие зенкера, который предназначен для обработки второй ступени.

Применяют ступенчатые сборные зенкеры со вставными ножами, а также оснащенные твердосплавными СМП.

Ступенчатая развертка (рис. 7.9, *г*) представляет собой инструмент для совмещенной обработки нескольких отверстий, расположенных соосно.

Для повышения точности обработки комбинированные развертки снабжают передними и (или) задними направляющими (рис. 7.9, *д*) либо направляющими, расположенными в средней части развертки.

При токарной обработке для получения центровых отверстий широко применяются **комбинированные центровочные сверла**. В зависимости от формы центровых отверстий центровочные сверла делятся на типы: *А*, *В*, *Р* и др. (рис. 7.10). Центровочные сверла представляют собой комбинацию двух инструментов: сверла и зенкера – и состоят, соответственно, из сверловочной и зенковочной частей. С целью повышения общей стойкости центровочные сверла изготавливают двухсторонними.

Стружечные канавки центровых сверл винтовые, наклонные под углом $\omega = 5^\circ$ к оси инструмента. Профиль сечения канавок прямолинейный с углом $90 \dots 110^\circ$. Ленточка на сверловочной и зенковочной частях отсутствует. Вместо нее спинку затылуют по архимедовой спирали. При

этом величина спада затылка обеспечивает в сечении, перпендикулярном к оси инструмента, задний угол $\alpha = 1 \dots 2^\circ$.

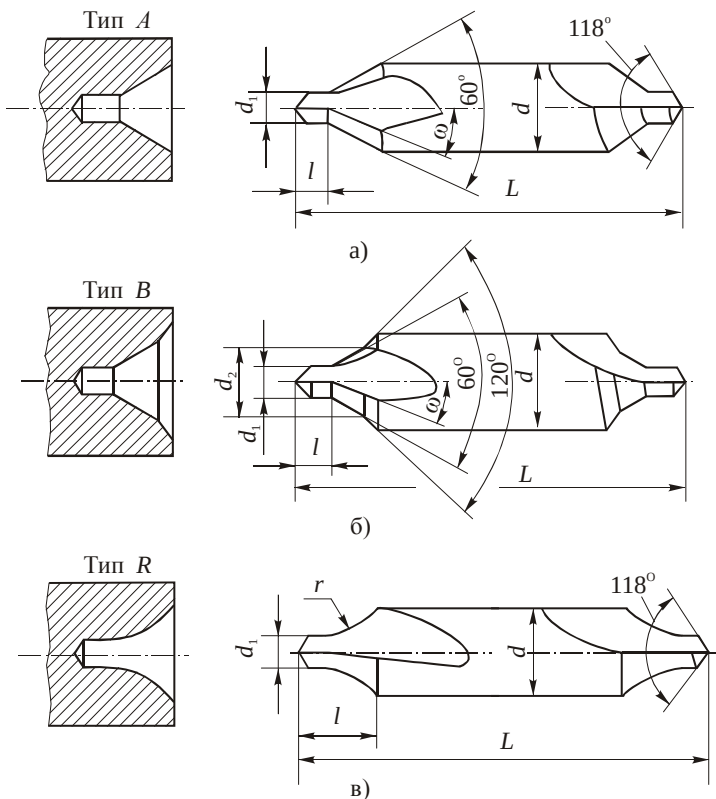


Рис. 7.10. Центровочные сверла-зенковки и получаемые ими типы отверстий:
 a – без предохранительной фаски; b – с предохранительной фаской;
 ϕ – радиусное

Диаметр сердцевини центровочного сверла $d_0 = (0,20 \dots 0,25)d_1$ и увеличивается по направлению к зенковочной части на $0,25 \dots 0,40$ мм на каждые 25 мм длины, а диаметр сверловочной части уменьшается в этом же направлении на $0,05 \dots 0,10$ мм на 25 мм длины. Заточка вершины сверловочной части центровочного сверла аналогична заточке спиральных сверл.

Зенковочная часть имеет форму режущих кромок, обеспечивающих получение конусных участков центровых отверстий. У сверл типа *B* предусмотрены режущие кромки для обработки предохранительной фаски. Передняя поверхность зенковочной части является продолжением передней поверхности сверловочной части, а задняя поверхность затылуется одновременно с затылованием спинки сверловочной части. У сверл типа *R* режущие кромки зенковочной части выполнены по радиусу. Такая форма центровых отверстий обеспечивает лучшую самоустановку валов в центрах и повышенную прочность сверл.

Центровочные сверла обычно изготавливают из быстрорежущей стали.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие схемы резания применяют при расточке отверстий? Типы расточных инструментов.
2. Особенности конструкций расточных инструментов для обработки глубоких отверстий.
3. Расточные инструменты для обработки глубоких отверстий.
4. Приведите примеры комбинированных инструментов для обработки отверстий. В чем преимущества и недостатки комбинированных инструментов?

8. ФРЕЗЫ

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

В процессе фрезерования в контакте с заготовкой, как правило, находится несколько зубьев, снимающих стружку переменной толщины. При этом благодаря большой суммарной активной длине режущих кромок обеспечивается высокая производительность процесса фрезерования. Повышению производительности также способствует высокая скорость фрезерования, которая достигается за счет периодического выхода зубьев из зоны резания, обеспечивающего охлаждение и снятие тепловой напряженности в режущем клине.

Кинематика фрезерования проста: фреза получает вращение от главного привода, а заготовка, закрепленная на столе станка, – движение подачи от отдельного привода станка, кинематически не связанное с вращением фрезы. Движение подачи может быть прямолинейным, вращательным или винтовым, а режущие кромки фрезы – прямолинейными, наклонными к оси, винтовыми или фасонными. Это обусловило появление огромного разнообразия конструкций фрез и широкую область их применения.

Фрезы можно классифицировать по следующим основным признакам:

- 1) конструкция режущих зубьев и способ их заточки – фрезы с остроконечными зубьями, перетачиваемыми по задней поверхности и с затупленными зубьями, перетачиваемыми по передней грани;
- 2) форма и расположение режущих кромок относительно оси вращения инструмента – фрезы цилиндрические, дисковые, торцевые, концевые, угловые, фасонные (рис. 8.1);
- 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 СТВ.

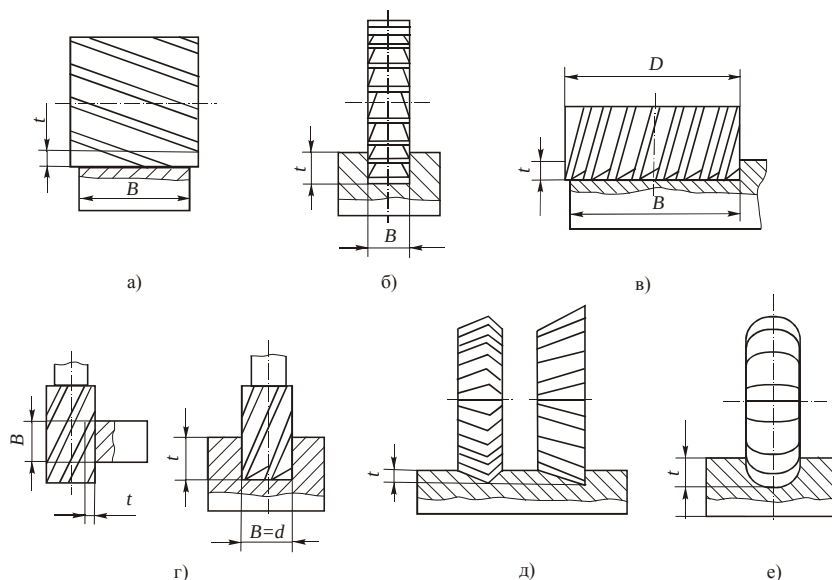


Рис. 8.1. Типы фрез: *а* – цилиндрическая; *б* – дисковая; *в* – торцевая; *г* – концевые; *д* – угловые; *е* – фасонная

8.1. Конструкции зубьев фрез.

Их достоинства и недостатки

Выше упоминалось, что по конструкции зубьев фрезы делятся на две большие группы: с остроконечными и с затылованными зубьями (рис. 8.2). 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.

Процесс фрезерования характеризуется снятием тонких стружек переменной толщины. При этом у цилиндрических фрез толщина стружки начинается с нуля. 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) допускалось возможно большее количество 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.

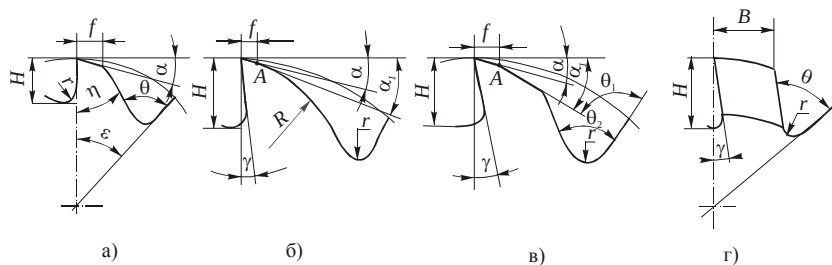


Рис. 8.2. Формы зубьев фрез: a – трапецевидная; $б$ – параболическая; $в$ – усиленная; $г$ – затылованный зуб

Трапецевидная форма (рис. 8.2, a) 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 $f = 1 \dots 2$ 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 фрезах изготавливают либо фрезерованием, либо вышлифовыванием эльборовыми или алмазными кругами в цельных заготовках на станках с ЧПУ.

Угол впадины θ между зубьями равен

$$\theta = \eta + \varepsilon, \quad (8.1)$$

где η – угол остроты зуба ($\eta = 45 \dots 50^\circ$); ε – угловой шаг зубьев ($\varepsilon = 360^\circ/z$).

Формула (8.1) 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 формуле (8.1), задавшись углами η и ε , определяют угол θ и округляют его до ближайшего значения из ряда предпочтительных чисел. Для винтовых зубьев число зубьев z и угол ε корректируют (z^*) с учетом угла наклона зуба к оси фрезы ω :

$$z^* = z / \cos^3 \omega; \quad \varepsilon = 2\pi / z^*.$$

Высоту зуба H можно найти по формуле

$$H = d / 2[1 - \cos \varepsilon + \sin \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \theta].$$

При переточке высота зуба уменьшается, поэтому суммарная стойкость таких фрез невелика, так как они допускают лишь $6 \dots 8$ переточек. Радиус впадины зуба берется равным $0,5 \dots 2,0$ мм.

Параболическая форма зуба (рис. 8.2, 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 $R = (0,3 \dots 0,4)d$.

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 $10 \dots 15^\circ$ (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. 8.2, 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 $\theta_1 = 28 \dots 30^\circ$ и θ_2 . Хотя при этом число операций увеличивается вдвое, такие зубья проще в изготовлении, чем параболические. Они имеют больший 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 $f_d = 0,02 \dots 0,03$ мм, которые упрощают контроль биения зубьев фрезы.

Затылованный зуб (рис. 8.2, з) 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 больший 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 остроконечными зубьями. Однако из-за простоты переточки они широко используются при обработке фасонных поверхностей.

Для снижения рассмотренных недостатков принимают ряд мер, указанных в разд. 8.4.

8.2. Особенности конструкций фрез с остроконечными зубьями

Цилиндрические и дисковые фрезы. Особенностью конструкций этих фрез является расположение главных режущих кромок на цилиндре, ось которого совпадает с осью вращения инструмента, параллельной обрабатываемой поверхности. У цилиндрических фрез нет вспомогательных режущих кромок, и они работают в условиях свободного резания. Зубья дисковых фрез, наоборот, на одном или обоих торцах снабжены вспомогательными режущими кромками. Причем, в отличие от цилиндрических фрез, их диаметр значительно больше длины фрезы. Оба типа фрез, как правило, насадные, с отверстием и шпоночными пазами для крепления на оправках.

Для снижения колебаний сил резания и вибраций зубья цилиндрических фрез часто делают винтовыми. При этом возникает нежелательная осевая составляющая силы резания. Однако условия отвода стружки из зоны резания фрез с винтовыми зубьями значительно лучше, чем фрез с прямыми зубьями.

Из теории резания металлов известно, что при наличии винтовых зубьев можно обеспечить равномерное фрезерование, если будет выдержано соотношение

$$B/P_x = C, \quad (8.2)$$

где B – ширина фрезерования; P_x – осевой шаг между зубьями, $P_x = \pi d / z \operatorname{tg} \omega$; C – заданное целое число; d – диаметр фрезы; z – число зубьев фрезы; ω – угол наклона зубьев к оси фрезы.

Из уравнения (8.2) следует, что для обеспечения более равномерной работы фрезы, снижения вибраций и шероховатости обработанной поверхности при выборе фрезы желательно брать такую конструкцию, у которой число зубьев будет совпадать или максимально приближаться к расчетному значению, найденному на основании уравнения (8.2):

$$z = C \pi d \operatorname{tg} \omega / B. \quad (8.3)$$

На практике, когда конструктору неизвестны условия работы фрезы, руководствуются следующей эмпирической формулой, полученной из опыта эксплуатации цилиндрических фрез:

$$z = m\sqrt{d}, \quad (8.4)$$

где m – коэффициент, зависящий от конструкции фрезы и условий ее работы ($m = 2$ – для чистовых фрез с мелким зубом и $\omega = 15...20^\circ$; $m = 1,5$ – для фрез с крупным зубом и ω до 30°).

Фрезы с мелким зубом изготавливают диаметром 40...90 мм. При малом угле ω осевые усилия небольшие, форма зуба трапецевидная, углы $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 16^\circ$.

Фрезы с крупным зубом имеют меньшее число зубьев. Угол ω у них может достигать до 45° , форма зуба усиленная или параболическая с высотой $H = (0,3...0,4)\pi d / z$.

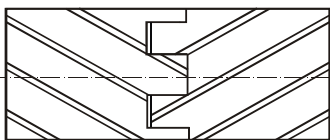


Рис. 8.3. Сдвоенные цилиндрические фрезы с разнонаправленными зубьями

При обработке сталей средней твердости углы $\gamma = 15...16^\circ$, $\alpha = 10...14^\circ$. Из-за больших осевых усилий необходимо принимать меры для их устранения, например путем крепления на одной оправке сдвоенных составных фрез с разнонаправленными зубьями (рис. 8.3). При этом осевые

усилия правой и левой фрез во время работы уравниваются.

Цилиндрические фрезы с крупным зубом предназначены для снятия больших припусков и особенно эффективны при обработке плоскостей большой площади. С целью экономии быстрорежущей стали фрезы больших диаметров делают сборными со вставными режущими зубьями, а корпуса фрез изготавливают из конструкционной стали.

Большое значение при конструировании фрез любого типа имеет правильное определение ее наружного диаметра. С увеличением этого диаметра можно увеличить число зубьев, а следовательно, и производительность процесса фрезерования, повысить жесткость крепления. Однако при этом возрастает крутящий момент и, следовательно, расход мощности при той же скорости резания, увеличивается время на врезание и перебег фрезы. Поэтому необходимо выбирать оптимальное значение диаметра фрезы.

Для сокращения номенклатуры фрез их наружные диаметры выбирают из ряда стандартных значений, числовая последовательность которых представляет собой геометрические прогрессии со знаменателями

$\varphi = 1,26$ и $1,58$, равными знаменателям частоты вращения шпинделей фрезерных станков. При смене фрез различных диаметров это позволяет обеспечить постоянство оптимальных скоростей резания за счет подбора соответствующего числа оборотов.

Стандартные цилиндрические фрезы диаметром $40 \dots 100$ мм и длиной до 160 мм изготавливают цельными, а диаметром $100 \dots 250$ мм, реже до 630 мм и длиной $45 \dots 100$ мм – сборными со вставными зубьями.

Диаметр посадочного отверстия d_o выбирается, с одной стороны, таким, чтобы обеспечить необходимую толщину стенки корпуса фрезы, с учетом глубины шпоночного паза, позволяющей избежать появления трещин при термообработке. С другой стороны, диаметр d_o зависит от допустимой стрелы прогиба оправки, на которую насаживается фреза и которая не должна превышать $\delta = 0,4$ мм при черновой и $\delta = 0,2$ мм при чистовой обработках.

В расчетах оправку можно рассматривать как балку, защемленную на концах. Диаметр фрезы можно рассчитать по формуле, учитывающей влияние радиальной нагрузки (через B , t , s_z) длины ℓ фрезы и допустимого δ прогиба оправки. Так, например, при обработке стали диаметр фрезы равен

$$d = 0,2B^{0,26}t^{0,09}s_z^{0,06}\ell^{0,78}\delta^{-0,26}. \quad (8.5)$$

При этом диаметр отверстия под оправку принимается из соотношения

$$d_o = (0,3 \dots 0,4)d. \quad (8.6)$$

Дисковые фрезы, в отличие от цилиндрических фрез, предназначены для обработки узких поверхностей, прорезки пазов, подрезки уступов, отрезки заготовок и т.д. Они работают в более тяжелых условиях несвободного резания, часто сопровождаемого вибрациями из-за низкой поперечной жесткости корпусов фрез и неблагоприятных условий отвода стружки из зоны резания.

Различают следующие виды дисковых фрез: двух- и трехстороннего резания, пазовые, прорезные и отрезные (пилы).

У дисковых двухсторонних фрез режущие кромки зубьев имеются на цилиндрической и одной торцевой поверхностях (рис. 8.4, а), а у трехсторонних – на обоих торцах (рис. 8.4, б). Эти фрезы могут обрабатывать соответственно две или три взаимно перпендикулярные поверхности в пазах и уступах. Они изготавливаются с мелкими зубьями для чистовой обработки и с крупными зубьями – для черновой обработки.

Последние характеризуются удалением больших объемов металла из глубоких пазов, выемок, поэтому они имеют большой объем стружечных канавок. Зубья у этих фрез при малой ширине режущих кромок или прямые, или наклонные к оси. Причем последние обеспечивают более равномерное фрезерование, имеют благоприятную геометрию торцевых зубьев и лучшее удаление стружки.

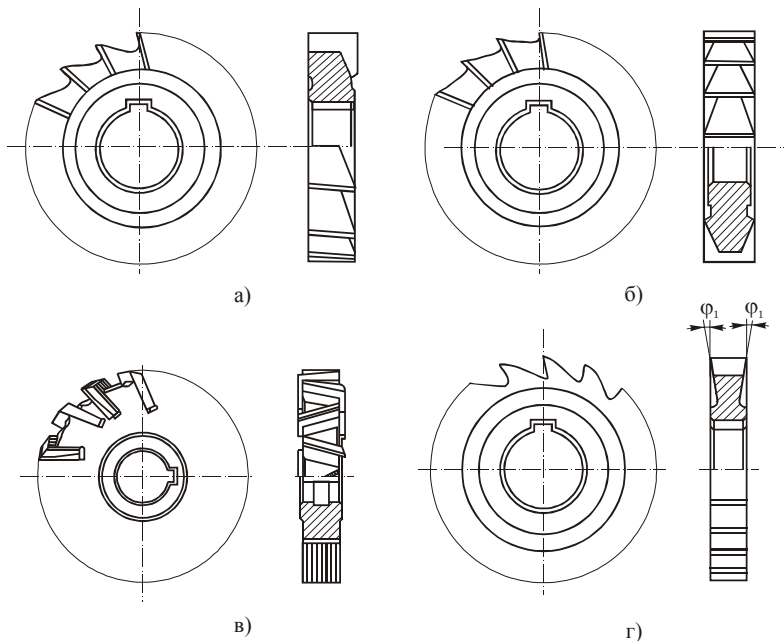


Рис. 8.4. Виды дисковых фрез: а – двухсторонняя; б – трехсторонняя; в – трехсторонняя с разнонаправленными вставными зубьями; г – пазовая

Трехсторонние фрезы изготавливают с разнонаправленными зубьями (фрезы «зигзаг»), что позволяет создать на торцевых режущих кромках положительные передние углы $\gamma_t > 0$ (рис. 8.4, в). При переточках ширина такой фрезы уменьшается, поэтому используют также двойные фрезы, состоящие из двух половинок, между которыми закладывают мерное кольцо. Целые фрезы изготавливают диаметром $d = 63 \dots 125$ мм и шириной $B = 6 \dots 28$ мм, а сборные со вставными ножами $d = 75 \dots 200$ мм и $B = 12 \dots 60$ мм. Такие ножи изготавливают из быстрот-

режущей стали с креплением в клиновидных пазах с помощью рифлений (рис. 8.5, б).

Пазовые фрезы (рис. 8.4, з) предназначены для фрезерования пазов, точных по ширине. Внешне они подобны дисковым трехсторонним фрезам, но имеют меньшую длину главных режущих кромок с геометрическими параметрами зубьев: $\gamma = 10...15^\circ$, $\alpha = 20^\circ$. Вспомогательные режущие кромки на торцах получают заточкой с углом в плане $\varphi_1 = 1...2^\circ$. Стружечные канавки у них нарезают только на цилиндрической части. Пазовые фрезы изготавливают диаметром 50...100 мм и шириной 3...16 мм. Иногда, чтобы при переточках сохранить постоянство ширины паза B , их изготавливают с затылованными зубьями.

Фрезы прорезные и отрезные (пилы) по форме зуба подобны пазовым фрезам и используются для прорезки неглубоких и узких пазов, например шлицевых, шириной $B = 0,2...6,0$ мм, а также для разрезки заготовок любого профиля и толщины. Целые фрезы диаметром 20...315 мм изготавливают с мелкими, средними и крупными зубьями, у которых углы $\gamma = 0...10^\circ$, $\alpha = 20^\circ$, $\varphi_1 = 30'...1^\circ$ (рис. 8.5, а). Сборные фрезы диаметром 250...2000 мм оснащают вставными ножами (рис. 8.5, б) либо сегментами из быстрорежущей стали, содержащими 4...8 зубьев и закрепляемыми заклепками на диске пилы, изготовленном из конструкционной стали (рис. 8.5, в). Для уменьшения трения и улучшения проникновения СОЖ в зону резания у зубьев с боковых сторон имеются выемки глубиной 0,5 мм. В отличие от других конструкций отрезных фрез, у сегментных пил спинка зубьев выполнена по дуге окружности, а переточка производится по передней поверхности на специальных стенках, работающих в полуавтоматическом режиме. При этом передний угол в зависимости от твердости обрабатываемого материала берется равным $\gamma = 0...25^\circ$. По мере износа пил предусматривается замена изношенных сегментов на новые.

С целью улучшения стружкоотвода и повышения стойкости зубьев у отрезных фрез при ширине реза более 2 мм используют различные схемы группового резания с делением среза по ширине и толщине между смежными зубьями. В практике используются различные схемы, две из которых приведены на рис. 8.5, з, д. В первой схеме предусмотрена заточка фасок шириной $c = 0,3\delta$ с разных сторон двух смежных зубьев, во второй – все зубья делятся на группы из двух (иногда из трех) зубьев, один из которых (прорезной) располагается с завышением по высоте на величину $h = 0,15...0,50$ мм и имеет по уголкам фаски шириной $c = 0,5...1,8$ мм, а другой – зачистной, изготавливается сплошным. Вто-

рая схема используется, например, в сегментных пилах, а также в шлицевых протяжках.

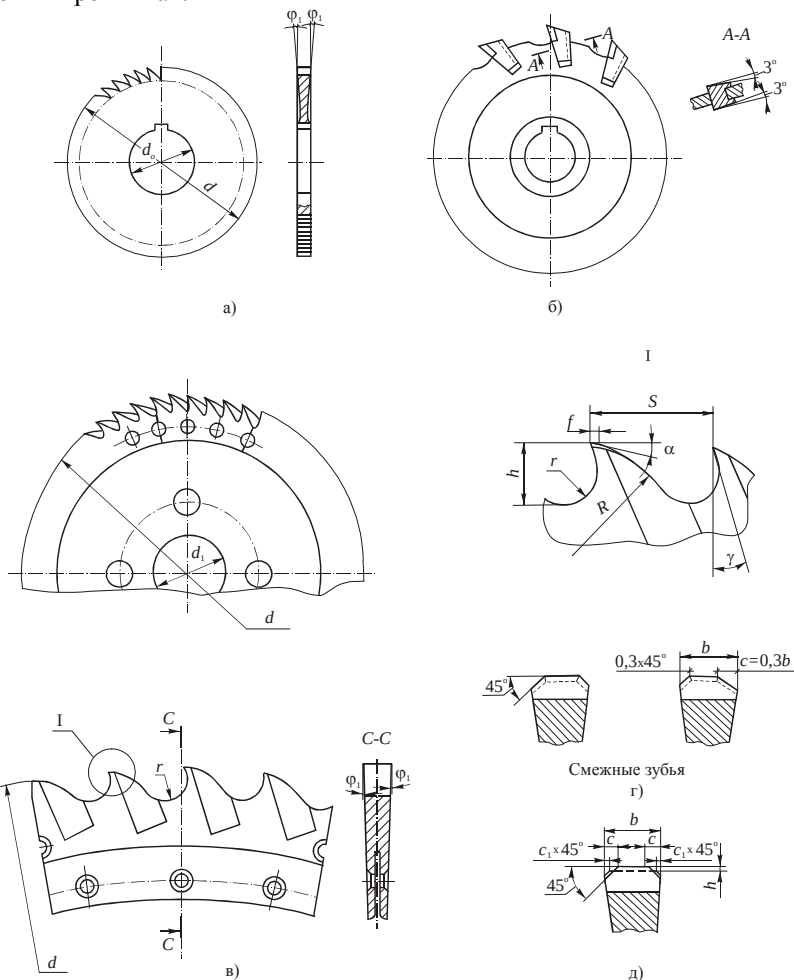


Рис. 8.5. Фрезы прорезные и отрезные: *а* – прорезная (шлицевая) и отрезная цельная; *б* – отрезная сборная (пила со вставными ножами); *в* – сегментная; *г, д* – схемы резания

У **торцевых и концевых фрез** (рис. 8.1, *в, г*) ось вращения расположена перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. При этом, кроме главных режущих кромок, находящихся на цилиндрической по-

верхности, на торце фрезы имеются вспомогательные режущие кромки, расположенные под углом φ_1 . Торцевые фрезы, как правило, изготавливают насадными, а когда их диаметр становится значительно меньше длины, то они переходят в группу концевых фрез. Торцевые фрезы широко используют при обработке плоских поверхностей, в том числе ступенчатых, которые невозможно обработать цилиндрическими фрезами. По сравнению с последними они имеют следующие преимущества:

1) конструкция торцевых фрез позволяет разместить большее число зубьев на длине контакта с заготовкой, что обеспечивает большую производительность и более равномерное фрезерование. При этом угол контакта не зависит от толщины срезаемого слоя;

2) торцевые фрезы можно изготавливать с жесткими, массивными корпусами, с надежным механическим креплением режущих элементов, например в виде СМП из твердого сплава и СТМ;

3) при фрезеровании плоскостей можно получать более низкую шероховатость за счет большого числа вспомогательных режущих кромок на торце фрезы и при наличии зачистных зубьев с $\varphi_1 = 0$.

Благодаря этим достоинствам торцевые фрезы по сравнению с другими типами фрез нашли наибольшее применение в металлообработке.

Главные режущие кромки торцевых и концевых фрез могут быть прямолинейными, но чаще всего они наклонные или винтовые ($\omega = 10...15^\circ$ – у торцевых и $\omega = 20...45^\circ$ – у концевых фрез). Благодаря этому обеспечивается лучший отвод стружки из зоны резания и более равномерная работа фрезы. Кроме того, из-за угла ω наклона зубьев к оси фрезы создаются положительные передние углы на торцевых режущих кромках.

Главный угол в плане φ у торцевых фрез можно изменять в широких пределах – от 90° и ниже. Для повышения стойкости и производительности обработки угол φ уменьшают до $45...60^\circ$ и даже до $10...20^\circ$. Такие фрезы называют **торцево-коническими**, так как главные режущие кромки у них находятся на конической поверхности (рис. 8.6). Стойкость и производительность таких фрез повышается за счет уменьшения толщины среза при заданной подаче на зуб. Однако при уменьшении угла φ до 10° резко возрастает осевая составляющая силы резания, отталкивающая фрезу от заготовки, в результате чего фрезерование оказывается возможным только на очень жестких станках.

Шероховатость поверхности при торцевом фрезеровании в основном зависит от вспомогательного угла в плане φ_1 . Из-за неизбежного биения торцевых режущих кромок на поверхности остаются микроне-

ровности, особенно заметные при обработке хрупких материалов, например чугунов. С целью снижения шероховатости у торцевых фрез обычно предусматривают заточку одного или двух зачистных зубьев с углом $\varphi_1 = 0$ и длиной кромки $\ell = (4 \dots 6)s$, где s – подача на один оборот фрезы ($s = s_z \cdot z$). На остальных зубьях угол $\varphi_1 = 2 \dots 3^\circ$. При обработке сталей на зачистных зубьях этот угол берут равным $\varphi_1 = 6 \dots 12'$.

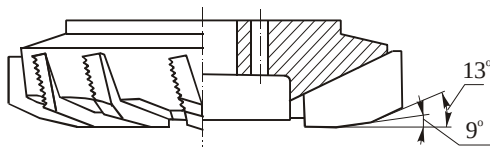


Рис. 8.6. Торцево-коническая сборная фреза

Стандартные цельные торцевые фрезы из быстрорежущей стали диаметром 40...100 мм и длиной 32...50 мм изготавливают с мелкими зубьями, число которых равно $z \approx 1,8\sqrt{d}$. Зубья винтовые с углом наклона к оси $\omega = 25 \dots 40^\circ$. Диаметр фрезы назначается с учетом ширины и вида фрезерования (симметричное, боковое и т.п.). Так, при симметричном фрезеровании плоскостей рекомендуется использовать фрезы диаметром $d = 1,2B$, где B – ширина обрабатываемой поверхности.

Передний угол γ на главных режущих кромках назначается с учетом свойств обрабатываемых материалов. При этом на торцевых режущих кромках передний угол на $3 \dots 5^\circ$ меньше, чем на цилиндрической части. Задние углы в сечении, перпендикулярном к оси фрезы, равны $\alpha = 12 \dots 14^\circ$, на торцевых кромках $\alpha_1 = 8 \dots 10^\circ$.

Торцевые фрезы больших диаметров ($d = 100 \dots 1000$ мм и более) чаще всего изготавливают сборными, оснащенными СМП. Реже применяются такие фрезы со вставными ножами из быстрорежущей стали и совсем редко с ножами, оснащенными эльбором. Последние используют для чистовой обработки высокопрочных чугунов и закаленных сталей.

При проектировании сборных фрез в их корпусах стремятся разместить как можно большее число зубьев. Однако оно ограничивается необходимостью размещения элементов их крепления. В любом случае на длине контакта с заготовкой должно быть не менее двух зубьев, т.е.

$$B > d \sin \frac{2\pi}{z}. \quad (8.7)$$

Если принять $d = (1,4 \dots 1,6)B$, то минимальное число зубьев фрезы равно $z_{\min} = 8 \dots 10$.

Концевые фрезы применяются для обработки пазов, уступов с взаимно перпендикулярными поверхностями и для контурной обработки заготовок. Главные режущие кромки, выполняющие основную работу по удалению припуска, как и у торцевых фрез, расположены на цилиндрической поверхности, а вспомогательные (зачищающие) – на торце. Зубья изготавливают обычно винтовыми, с углом наклона к оси, достигающим до $\omega = 30 \dots 45^\circ$. Такое большое значение угла ω при наличии больших по объему стружечных канавок обеспечивает надежный отвод стружки из зоны резания даже при весьма стесненных условиях резания. По этой причине число режущих зубьев у концевых фрез значительно меньше, чем у торцевых фрез. Однако при этом снижение производительности компенсируется за счет увеличения подачи на зуб.

На рис. 8.7, а приведены трехзубая стандартная концевая фреза и ее геометрические параметры. Хвостовики таких фрез либо цилиндрические ($d = 3 \dots 20$ мм), либо конические с конусом Морзе ($d = 14 \dots 63$ мм). У фрез больших диаметров используются хвостовики с конусом 7:24. Крепление фрез в шпинделе станка при цилиндрическом хвостовике производится с помощью цанговых патронов, а при коническом хвостовике, имеющем внутреннюю резьбу, – штрелелем (натяжным болтом), проходящим через полый шпиндель станка.

Разновидностью концевых фрез являются **шпоночные фрезы** и **фрезы для обработки Т-образных пазов**, нашедших широкое применение в столах станков и корпусах станочных приспособлений.

Шпоночные фрезы (рис. 8.7, б, в) имеют два зуба с глубокими прямыми или наклонными ($\omega = 12 \dots 15^\circ$) стружечными канавками и длиной рабочей части, равной примерно трем диаметрам фрезы. При этом диаметр сердцевины фрезы увеличен до $0,35d$, благодаря чему обеспечивается максимальная жесткость инструмента.

Особенность условий работы шпоночных фрез заключается в том, что шпоночный паз они обрабатывают за несколько проходов. В конце каждого прохода производится врезание на глубину паза путем вертикальной подачи вдоль оси фрезы. Эту работу выполняют режущие кромки, расположенные на торце фрезы, заточенные с углом поднутрения $\varphi_1 = 5^\circ$ по конусу с вершиной, направленной в сторону хвостовика и с задним углом $\alpha_1 = 20^\circ$. Чтобы избежать при этом значительного увеличения осевой составляющей силы резания, у быстрорежущих фрез делают подточку поперечной кромки, как у сверл. У шпоночных фрез с напайными твердосплавными пластинами (рис. 8.7, в) одна из пластин

доходит до центра, а другая делается короче и отстоит от центра на некотором расстоянии. Благодаря этому значительно упрощается технология изготовления фрезы и улучшается процесс резания.

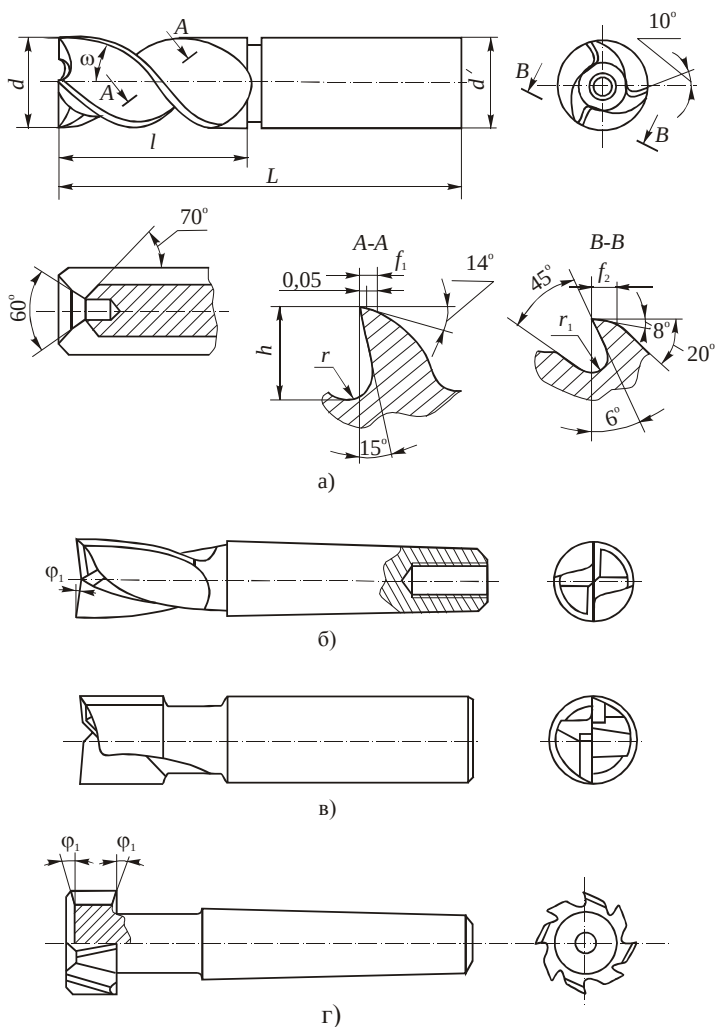


Рис. 8.7. Фрезы концевые: а – стандартная концевая фреза; б – шпоночная фреза из быстрорежущей стали; в – шпоночная фреза с напайными твердосплавными пластинами; г – фреза для обработки Т-образных пазов

Переточка шпоночных фрез производится по задним поверхностям торцевых кромок. При этом диаметр фрезы сохраняется неизменным, что необходимо для обеспечения постоянства размера паза.

Фрезы для обработки Т-образных пазов (рис. 8.7, з) работают в тяжелых условиях и часто ломаются из-за пакетирования стружки. Для улучшения ее отвода такие фрезы делают с разнонаправленными зубьями и с углом поднутрения на торцах, равным $\varphi_1 = 1 \dots 2^\circ$.

Угловые и фасонные фрезы с остроконечным зубом по способу обработки подобны дисковым фрезам. Они изготавливаются, как правило, цельными, насадными, а фрезы небольших диаметров иногда имеют хвостовики.

Главные режущие кромки у одноугловых фрез расположены на поверхности усеченного конуса, а у двухугловых – на поверхности двух смежных конусов. Эти фрезы используются в основном как инструменты второго порядка для нарезания канавок у многозубых инструментов, например фрез, разверток и др., а также для обработки различных пазов, скосов и наклонных поверхностей.

Диаметр фрез выбирается исходя из глубины фрезерования и диаметра оправки. Число зубьев рассчитывается по эмпирической зависимости

$$z = (2,5 \dots 2,8) \sqrt{d} . \quad (8.8)$$

При этом большее значение коэффициента берется для фрез меньших диаметров.

При работе одноугловых фрез возникает осевая составляющая силы резания, а у двухугловых она частично или полностью (при симметричном профиле) уравнивается. Благодаря этому двухугловые фрезы обеспечивают более высокое качество обработанной поверхности, чем одноугловые фрезы. Угол конуса у одноугловых фрез принимается равным $\theta = 18 \dots 30^\circ$, а у двухугловых – $\theta_1 = 55 \dots 110^\circ$ (через 5°) и $\theta_2 = 15 \dots 25^\circ$. При этом у одноугловых фрез зубья на торце затачивают с небольшим углом поднутрения $\varphi_1 = 2 \dots 3^\circ$.

Фасонные фрезы представляют собой тела вращения, на наружной поверхности которых располагаются зубья с самыми различными по форме режущими кромками. Они работают так же, как дисковые и угловые фрезы, и предназначены для фрезерования выпуклых или вогнутых фасонных наружных поверхностей, а также прямых или винтовых канавок.

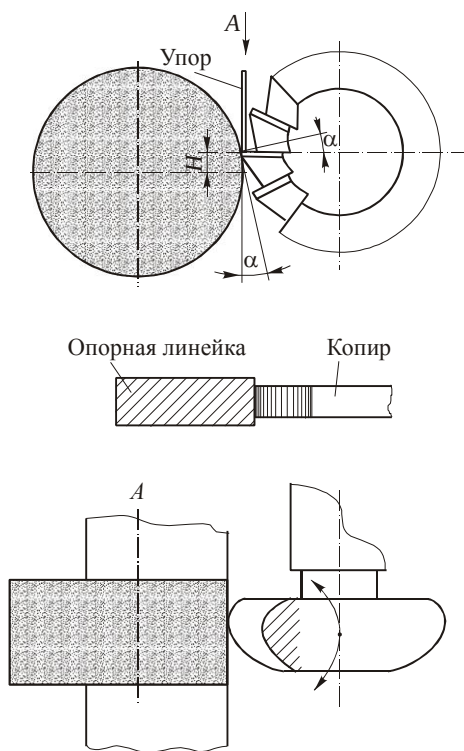


Рис. 8.8. Схема заточки фасонной фрезы с остро-
конечными зубьями

показанной на рис. 8.8. Здесь по опорной линейке обкатывается копир, жестко связанный с затачиваемой фрезой и имеющий форму, подобную профилю фрезы. При этом задний угол создается за счет превышения оси фрезы над осью круга на величину $H = d/2 \sin \alpha$.

8.3. Особенности конструкций фрез, оснащенных твердым сплавом

Конструкции фрез и условия их работы позволяют широко использовать для их оснащения высокопроизводительные твердые сплавы, минералокерамику и СТМ, которые, однако, обладают пониженной

При переточке по задней поверхности фасонных фрез с остроконечными зубьями трудно обеспечить идентичность формы режущих кромок, поэтому требуются специальные копировальные устройства, обеспечивающие необходимую траекторию шлифовального круга. Такая заточка очень трудоемка, в связи с этим фасонные фрезы обычно изготавливают с затылованными зубьями.

В случаях, когда фасонные режущие кромки имеют относительно простую конфигурацию, их изготавливают с остроконечными зубьями, учитывая высокую производительность таких фрез. При этом для переточки фрез с остроконечными зубьями используются специальные приспособления, работающие, например, по схеме,

прочностью на изгиб и хрупкостью. Широкому применению твердых сплавов способствуют следующие достоинства процесса фрезерования: 1) благоприятная форма стружки, имеющая малую толщину и длину, обеспечивающая ее хорошую транспортабельность; 2) прерывистость процесса резания, снижающая тепловое напряжение режущих элементов; 3) высокие жесткость и виброустойчивость.

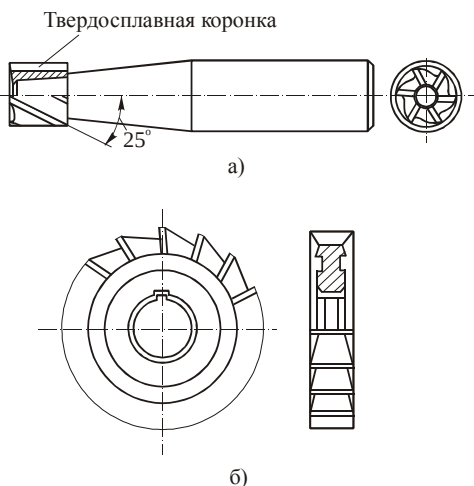


Рис. 8.9. Мелкоразмерные твердосплавные фрезы: а – концевая фреза с монолитной твердосплавной режущей частью; б – дисковая твердосплавная фреза

Эти свойства обусловили благоприятные возможности для применения СМП, а большие размеры корпусов фрез позволяют размещать на них элементы крепления сменных пластин.

К недостаткам процесса фрезерования относятся: 1) работа с ударами; 2) высокая вероятность работы в условиях неравномерного фрезерования, вызывающего колебания и вибрации; 3) врезание с нулевой толщиной стружки (при цилиндрическом

фрезеровании); 4) затрудненное стружкоудаление при работе концевых, дисковых и пазовых фрез; 5) высокая стоимость изготовления сборных фрез при жестких требованиях к осевому и радиальному биениям режущих кромок.

Однако, как показала практика, принимая меры к устранению или снижению влияния неблагоприятных факторов на стойкость и производительность процесса фрезерования, удалось добиться в большинстве конструкций фрез широкого применения новых марок режущих материалов и главным образом твердых сплавов. Особенно высокие результаты в этом направлении получены при разработке конструкций торцевых фрез, оснащенных СМП, которые практически вытеснили ранее широко применяемые фрезы с напайными твердосплавными пластинами.

Напайные пластины используют только при изготовлении мелко-размерных фрез, в которых не удастся разместить элементы механического крепления пластин. Но даже и в этих случаях при резании труднообрабатываемых материалов предпочтение отдается монолитным фрезам, изготовленным целиком из твердого сплава и полученным путем прессования в специальных пресс-формах.

Применяются также способы изготовления монолитных фрез или их режущей части методом вышлифовывания из твердосплавных заготовок алмазными кругами, а также резанием из пластифицированных заготовок с последующим их спеканием. Освоено, например, производство цельных твердосплавных концевых фрез диаметром 3...12 мм (рис. 8.9, а), а также узких дисковых и других видов фрез с прямыми или винтовыми зубьями (рис. 8.9, б). При этом концевые фрезы изготавливают или заодно с цилиндрическим хвостовиком, или в виде коронок и вставок, соединяемых пайкой со стальным хвостовиком.

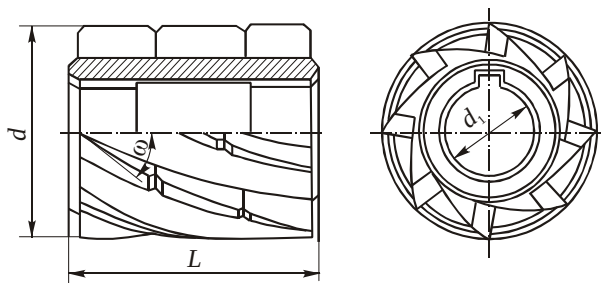


Рис. 8.10. Цилиндрическая фреза, оснащенная напайными винтовыми твердосплавными пластинами

В настоящее время в конструкциях фрез средних и крупных размеров способ пайки твердосплавных *пластин* на корпуса инструментов используется в том случае, когда режущие пластины имеют фасонную форму. Так, например, на рис. 8.10, а показана цилиндрическая фреза напайными винтовыми пластинами, которые удастся изготавливать только небольшой длины¹. Каждый зуб представляет собой набор из таких пластин, а их стыки оформлены в виде стружколомающих канавок. Основным недостатком такой фрезы является необходимость повторной пайки и заточки всех зубьев в случае поломки хотя бы одной из

¹ В последнее время за рубежом освоен выпуск винтовых твердосплавных пластин большой длины.

пластин. С винтовыми напайными пластинами изготавливаются также концевые фрезы с небольшой длиной рабочей части.

Цилиндрические фрезы в силу специфики их конструкций и условий резания значительно реже по сравнению с торцевыми оснащаются твердосплавными СМП.

Торцевые фрезы допускают большее разнообразие способов крепления многогранных пластин, и поэтому в настоящее время освоено выпуск огромного числа различных типов таких фрез, наиболее сложные из которых позволяют производить регулировку положения пластин в корпусе с целью получения минимального радиального и торцевого биений режущих кромок.

Анализ современных конструкций торцевых фрез показывает, что основными направлениями в использовании СМП являются: 1) крепление пластин непосредственно на корпусе или его составных частях; 2) использование вкладышей с двумя-тремя базами под пластины; 3) использование механизма регулирования положения режущих кромок пластин относительно оси вращения фрезы.

При этом широко применяются пластины трех-, четырехгранные, в форме параллелограмма, реже круглые и пятигранные, негативные и позитивные по геометрическим параметрам, с отверстиями для крепления или без них. Крепление пластин осуществляется винтами или рычагами через отверстие, а также клиньями, прижимающими пластину к гнезду в корпусе или во вкладыше. Рассмотрим на отдельных примерах реализацию указанных выше направлений.

На рис. 8.11, а приведена фреза с креплением пластин 2 в гнездах корпуса 1. Крепление осуществляется винтами 3 с конической головкой. Для предохранения корпуса от повреждений при поломке пластин часто используют подкладки 4 из твердого сплава или закаленной стали, имеющие форму, подобную форме режущих пластин. Фрезы такого типа наиболее просты по конструкции, компактны, имеют минимальное число деталей, но корпуса этих фрез сложны в изготовлении. Серьезными недостатками этих фрез являются: опасность механического повреждения корпусов в процессе эксплуатации и повышенное биение режущих кромок, вызываемое погрешностями изготовления гнезд под пластины.

Иногда с целью упрощения технологии изготовления фрез и повышения точности положения режущих кромок базы под пластины создают на составных частях корпуса. Примером таких фрез является представленная на рис. 8.11, б фреза фирмы «Clarkson» (Англия). Она состоит из корпуса 1 и опорного кольца 3, на каждом из которых имеется

одна база под пластины 2. При этом пластины крепят клином 4 с дифференциальным винтом 5, который ввертывается не в корпус фрезы, а в специальный вкладыш 6.

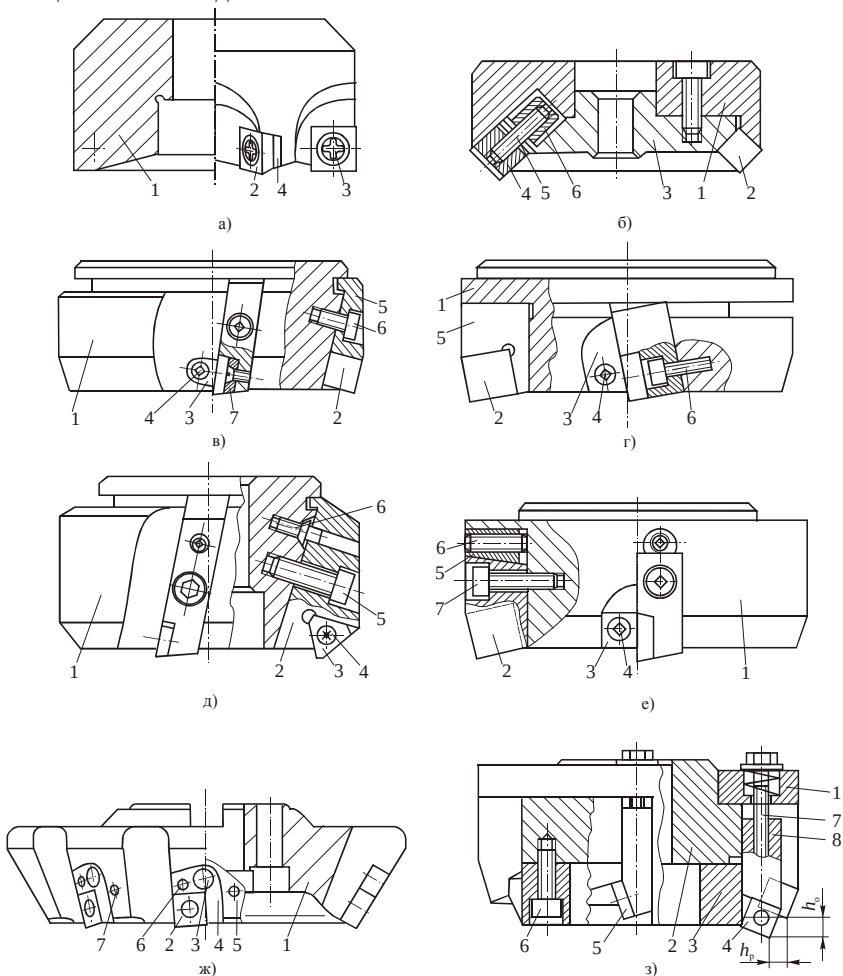


Рис. 8.11. Торцевые фрезы, оснащенные СМП: *а* – базы под пластины в корпусе фрезы; *б* – базы под пластины на составных частях корпуса; *в* – с вкладышами и двумя базами; *г* – с вкладышами (кассетами) и тремя базами во вкладышах; *д* – с вкладышами, регулируемые винтом; *е* – с вкладышами, регулируемые клином; *ж* – с тангенциальным креплением пластин; *з* – со ступенчатым расположением пластин

Использование вкладышей для крепления пластин показано также на рис. 8.11, в на примере фрезы фирмы «Widia Kupp» (Германия). Здесь режущие пластины 2 крепятся во вкладышах 5, устанавливаемых в пазах корпуса 1 и закрепляемых винтами 6. Вылет вкладышей вдоль оси задан точно благодаря тому, что они упираются в стенку кольцевого паза корпуса, получаемого точением напроход. Режущие пластины 2 опираются на дно гнезда во вкладыше, а в радиальном направлении – на корпус фрезы. Крепление пластин производится клином 3 и винтом 4. Под режущие пластины устанавливаются предохранительные пластины 7, закрепляемые винтами. Таким образом, корпус получается технологичным, а крепление обеспечивает малое биение режущих кромок. Использование вкладышей также позволяет избежать повреждения дорогостоящего корпуса при поломке пластин и осуществлять их быструю замену. В этой конструкции использованы вкладыши с двумя базами под пластины: по опорной плоскости и одной грани пластины.

Созданы также конструкции фрез с базированием пластин во вкладыше по трем плоскостям. Примером таких фрез являются фрезы фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция) (рис. 8.11, з). Здесь вкладыши (кассеты) 5 в осевом направлении упираются в стенку кольцевого паза и крепятся в корпусе 1 винтом 6. Режущие пластины 2 прижимаются клином 3 с помощью винта 4. При этом в одном и том же корпусе фрезы могут устанавливаться вкладыши с гнездами под различные формы и размеры режущих пластин, в том числе из разных инструментальных материалов, что упрощает ведение инструментального хозяйства. Такой метод конструирования фрез получил название **модульно-кассетного**. Его особенно выгодно использовать в условиях гибкого автоматизированного производства, характеризующегося быстрой сменностью номенклатуры изделий и требующего особой мобильности в обеспечении инструментальной оснасткой.

Для обеспечения высокой точности расположения режущих кромок относительно оси вращения фрезы создан ряд конструкций фрез с регулировкой в осевом направлении положения вкладышей в пазах корпуса с помощью винтов или клиньев, в результате чего удается довести торцевое биение до 0,005 мм. При этом в зависимости от диаметра фрезы радиальное биение составляет 0,05...0,10 мм, что достигается за счет высокой точности исполнения корпусов фрез, кассет и использования прецизионных пластин. Примером таких инструментов может служить фреза фирмы «Walter» (Германия), представленная на рис. 8.11, д. Здесь вкладыши 2, установленные в пазах корпуса 1 крепятся винтами 5. Режущие трехгранные пластины 3 крепят винтами 4 через их центральные

отверстия. В случае применения этих фрез для чистовой обработки используют регулировочный винт 6, ось цилиндрической части которого смещена относительно оси конического отверстия в корпусе. За счет этого при вращении винта 6 происходит перемещение вкладыша вдоль паза корпуса и тем самым регулируется положение режущих кромок пластин в осевом и радиальном направлениях.

Простой способ регулировки положений вкладышей с помощью клиньев показан на примере фрезы фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция) (рис. 8.11, *е*). Здесь крепление пластин 2 осуществляется прижатием клина 3 винтом 4, а крепление вкладыша к корпусу 1 – винтом 7. Смещение вкладыша вдоль оси фрезы регулируется с помощью винта 6 и клина 5.

Рассмотрим еще две разновидности торцевых фрез, оснащенных СМП: с тангенциальным (рис. 8.11, *ж*) и ступенчатым расположением пластин (рис. 8.11, *з*).

Фрезы с тангенциальным по отношению к корпусу расположением пластин впервые были предложены фирмой «Hertel» (Германия). За счет такого расположения пластин резко увеличивается их прочность при ударной нагрузке. При этом крепление пластин 2 с отверстием производится винтом 3 через изогнутый в виде рычага штифт. Для базирования пластин 2 используют вкладыши 4 и 5. Первый вкладыш фиксируют в гнезде корпуса 1 штифтом 6, а второй, регулируемый в осевом направлении, винтом 7. Такие фрезы позволяют значительно увеличить подачу, а следовательно, и производительность, но из-за уменьшенной длины режущих кромок они пригодны только для снятия небольших припусков.

Таким же недостатком обладают и другие вышеприведенные конструкции фрез, за исключением фрез, оснащенных пластинами в форме параллелограмма, наибольшая сторона которого выступает в качестве главной режущей кромки.

Для фрезерования заготовок с большими припусками рекомендуются фрезы со ступенчатым вдоль оси расположением пластин, которое, как показала практика, обеспечивает хорошее деление припуска по ширине и безвибрационную работу инструмента, что особенно важно для фрез, оснащенных твердым сплавом. На рис. 8.11, *з* показана двухступенчатая фреза конструкции ВНИИинструмент, которая отличается тем, что у нее режущие пластины 4 и 5 расположены на разных уровнях от торца. Пластины опираются на кольцо 3 с пазами и внешней конической ступенчатой формой, которое крепится винтами 6 на корпусе 2, имеющем такие же пазы. Таким образом, сменные пластины 4 и 5 оказыва-

ются смещенными в радиальном и осевом направлениях. Пластины прижимаются к пазам в корпусе 2 и кольце 3 с помощью винтов 7, ввертываемых в державки 8, на которые они устанавливаются с посадкой на штифты. Винты 7 опираются на кольцо 1, напрессованное на корпус 2.

Концевые и дисковые фрезы труднее всего поддаются оснащению механически закрепляемыми пластинами в силу их конструктивных особенностей и условий резания. Тем не менее в настоящее время такие фрезы выпускают все в больших объемах. Некоторые из конструкций этих фрез приведены на рис. 8.12 и 8.13.

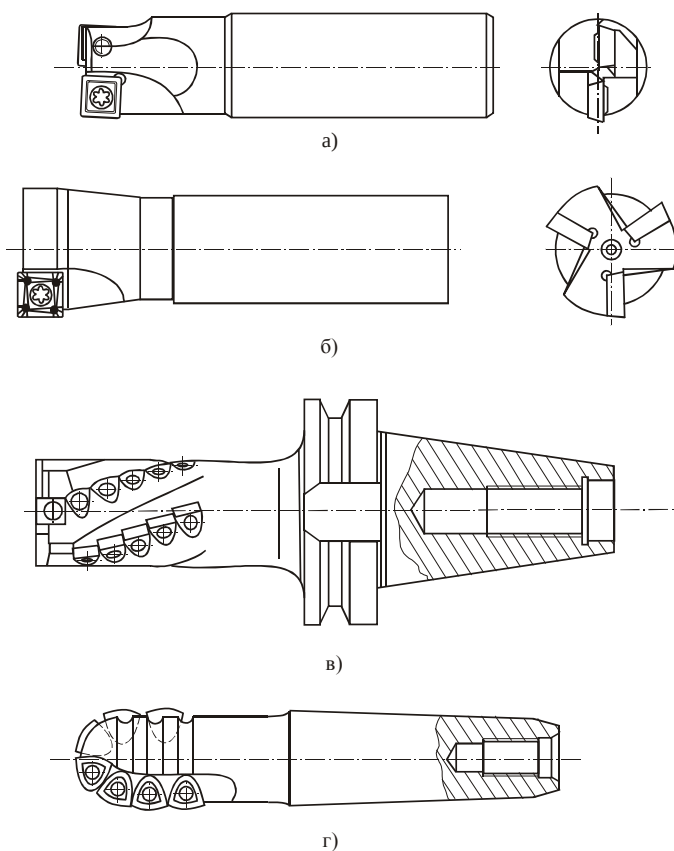


Рис. 8.12. Концевые фрезы, оснащенные СМП: а – двузубая; б – трехзубая; в – для обработки глубоких пазов; г – для копировальных работ

Из-за малых диаметров концевых фрез и малой ширины среза у дисковых фрез базы под пластины выполняются непосредственно в корпусах инструментов. Крепление режущих пластин осуществляется винтами через отверстия, клиньями и прихватами сверху или упругими деформируемыми элементами (у пластин без отверстия). Формы режущих пластин – треугольные, квадратные, круглые, ромбические, прямоугольные или специальные, разработанные только для таких инструментов. Число режущих пластин определяется конструктивными размерами инструментов. Так, например, у концевых фрез $d \leq 12$ мм $z = 1$, а $d = 12 \dots 40$ мм – $z = 2 \dots 4$. Для лучшего дробления стружки и создания положительных передних углов рекомендуется использовать позитивные или негативные пластины со стружкодробящими канавками на передней грани.

На рис. 8.12, *а*, *б* приведены двузубая и трехзубая концевые фрезы фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция), оснащенные позитивными ($\alpha = 11^\circ$) прямоугольными пластинами, применяемые для обработки уступов, пазов и выемок.

На рис. 8.12, *в* показана концевая фреза $d = 20 \dots 50$ мм для обработки глубоких пазов или высоких уступов длиной до 70 мм с креплением пластин винтами в гнездах, расположенных по винтовой линии. На рис. 8.12, *г* показана фреза для копировальных работ, применяемая при обработке фасонных выемок в пресс-формах, оснащенная специальными пластинами радиусной формы.

Хвостовики концевых фрез могут быть цилиндрическими, коническими или специальными короткими цилиндрическими. На станках с ЧПУ эти фрезы закрепляются в специальных патронах.

Дисковые фрезы, оснащенные твердосплавными пластинами, до недавнего времени применяли обычно в напайном варианте. Однако вследствие сложности заточки и особенно из-за отпаивания режущих пластин при нагреве (особенно на трехсторонних фрезах) все большее распространение получают фрезы с механическим креплением СМП. В конструкциях этих фрез в основном использованы те же способы и элементы крепления, что и в конструкциях торцевых фрез. Однако здесь возникают дополнительные трудности, связанные с необходимостью размещения элементов крепления в узких корпусах фрез. У трехсторонних фрез необходимо также обеспечить надежный стружкоотвод и положительные передние углы на торцевых режущих кромках.

Одним из вариантов решения этой задачи является конструкция фрезы фирмы «Heinlein» (Германия), представленная на рис. 8.13, *а*. Здесь трехгранные (без отверстия) пластины 2 крепятся в корпусе 1 с

помощью клиньев 3 и винтов 4, а также колец 5 и винтов 6. В свою очередь, кольца крепятся на ступице корпуса 1 и служат одной из баз под режущие пластины. Другой базой являются открытые пазы в корпусе фрезы с разным направлением наклона к оси смежных зубьев (типа «зигзаг»), обеспечивающим положительные передние углы на торцевых режущих кромках. Клинья 3 фрезы, крепящие пластины, расположенные за режущими пластинами 2, предохраняют корпус от повреждений при поломке пластин и увеличивают пространство для размещения стружки. К недостаткам таких фрез следует отнести большое число сопрягаемых деталей, требующих точного исполнения.

Выпускают также фрезы с вкладышами, имеющими две или три базы для крепления пластин. На рис. 8.13, б схематично показано крепление трехгранных пластин 2 во вкладышах 5 клиньями 3 и винтами 4. Вкладыши 5 имеют V-образные пазы под пластины и располагаются со стороны передней поверхности пластин 2. Они крепятся в корпусе 1 винтами 6. У таких фрез вкладыши сменные, корпус хорошо предохраняется от повреждений, обеспечивается нормальный стружкоотвод, но они могут успешно применяться только при относительно небольших глубинах резания.

Более технологичное, компактное и надежное крепление пластин 2 достигается винтами с конической головкой через отверстие к вкладышу 3, а крепление вкладыша в корпусе 1 осуществляется с помощью клина 4 и винта 5. Для предохранения вкладышей от смещения при больших нагрузках и регулировке по высоте на их опорных поверхностях и в гнездах создают рифления (рис. 8.13, в).

При обработке резанием пазов небольшой ширины ($B = 5 \dots 10$ мм) и большой глубиной реза ($h = 18 \dots 84$ мм) фирмой «Sandvik Coromant» (Швеция) разработаны дисковые фрезы диаметром $d = 80 \dots 250$ мм с непосредственным креплением специальных пластин винтами с двух сторон корпуса (рис. 8.13, г). Эти пластины имеют положительные передние углы. При тангенциальном креплении они обладают наибольшей прочностью, а при наличии четырех режущих кромок – большей стойкостью.

Для отрезных работ с $B = 2 \dots 6$ мм, $h = 17 \dots 87$ мм этой же фирмой созданы фрезы диаметром $80 \dots 315$ мм (рис. 8.13, д) со вставными пластинами специальной формы, разработанными для отрезных резцов (см. рис.2.5). Крепление пластин в корпусе осуществляется за счет упругих деформаций стенок пазов и сил трения при установке их в клинообразных пазах.

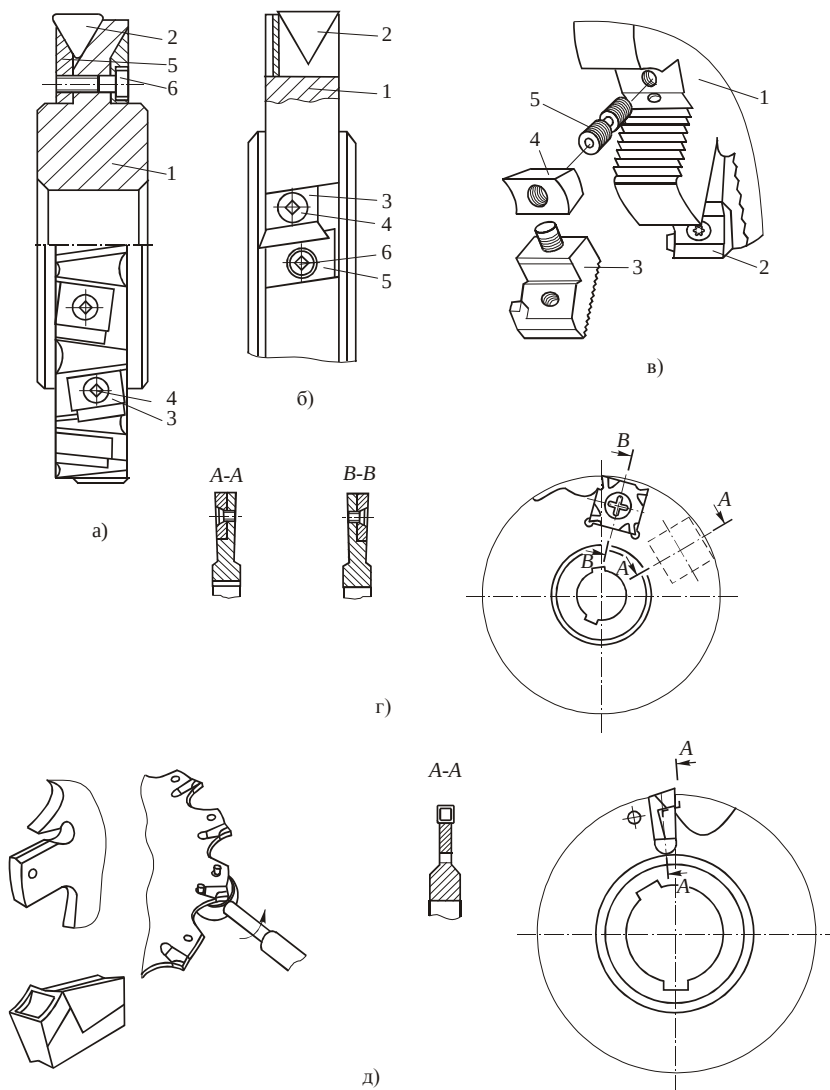


Рис. 8.13. Дисковые фрезы, оснащенные СМП: а – трехсторонняя с «открытыми» базами под пластины; б – трехсторонняя с базированием пластин во вкладышах; в – с креплением пластин и вкладышей винтами; г – с тангенциальным креплением пластин; д – со специальными пластинами для отрезных работ (слева показана схема снятия пластины)

Замена пластин при поломках или выкрашивании производится с помощью специального ключа (рис. 8.13, д). Специальная форма передней грани пластин обеспечивает хорошее дробление стружки, наименьшие силы резания и высокую надежность фрез.

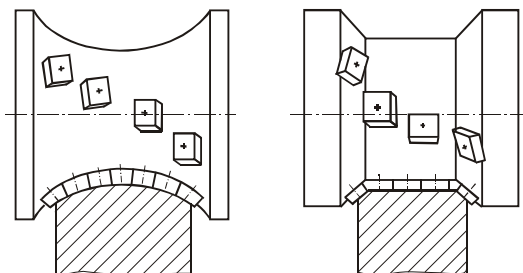


Рис. 8.14. Схемы фрез, оснащенных СМП, для обработки фасонных поверхностей

В последнее время многогранные пластины с механическим креплением применяются даже при конструировании фасонных фрез. На рис. 8.14 схематично показаны примеры оснащения насадных фасонных фрез наборами пластин с закреплением их винтами на корпусе, применяемых для обработки самых различных фасонных профилей. Корпусы таких фрез с гнездами под пластины весьма сложны в изготовлении. Успешное решение этой задачи стало возможным благодаря использованию многооперационных станков с ЧПУ.

8.4. Фрезы с затылованными зубьями

Эти фрезы получили широкое распространение в машиностроении, главным образом при обработке деталей с фасонными профилями. Некоторые из фрез стандартизованы: полукруглые, пазовые, дисковые, червячные (для нарезания зубчатых колес), гребенчатые (для нарезания резьбы) и др. Их изготавливают чаще всего в виде насадных фрез – дисковых или цилиндрических, реже – концевых фрез с фасонными главными режущими кромками. В процессе эксплуатации такие фрезы перетачиваются только по передней грани. Их достоинства и недостатки рассмотрены в разд. 8.1.

Для создания задних углов на фасонных режущих кромках фрезы используется процесс затылования, осуществляемый на специальных станках по схеме (рис. 8.15). Здесь фреза вращается вокруг оси, а затыловочный резец с фасонной режущей кромкой совершает возвратно-

поступательные движения. Резец приближается к центру фрезы при ее повороте на $1/z$ оборота, а затем отскоком отходит от фрезы после обработки одного зуба и при подходе следующего. Цикл этих движений повторяется на каждом зубе, т.е. за один оборот фрезы резец совершает z возвратно-поступательных движений. Чтобы полностью обработать заднюю поверхность зубьев, фреза в процессе затылования делает несколько оборотов, так как за один оборот резец не может обработать большую площадь задней поверхности зуба, которая в конечном итоге представляет собой совокупность бесконечного числа следов фасонных режущих кромок резца, расположенных в радиальном сечении и сдвинутых одно относительно другого в направлении к центру фрезы. Благодаря этому создаются задние углы во всех точках режущих кромок, а при переточке по передней грани их форма в радиальном сечении будет оставаться неизменной.

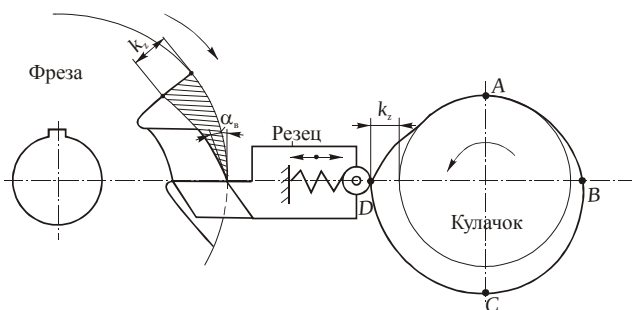


Рис. 8.15. Схема процесса затылования (затыловочный резец показан в конце затылования)

При затыловании каждая точка режущих кромок перемещается по кривой затылования с приближением к центру фрезы по мере ее поворота. При этом, чтобы задние углы имели положительное значение, траектория движения каждой точки должна быть расположена внутри окружности, проведенной через эту точку из центра фрезы.

Форма кривой затылования задается формой кулачка (см. рис. 8.15), который управляет перемещением резца по мере поворота фрезы. При этом участок кулачка $ABCD$ определяет рабочий ход затыловочного резца, а участок DA – холостой ход, при котором резец отходит от зуба фрезы. Полученная кривая затылования определяет картину изменения задних углов в процессе переточки и их величину в различных точках режущей кромки по высоте зуба.

К форме кривой предъявляются следующие требования: 1) задние углы при переточках и при изменении расстояния точки по высоте зуба не должны уменьшаться; 2) форма кулачка должна быть простой в изготовлении и не зависеть от диаметра фрезы и числа зубьев. Из известных кривых, применявшихся для затылования (логарифмическая и архимедова спирали, конхоида прямой и др.), этим требованиям лучше всего отвечает архимедова спираль (рис. 8.16), которая и нашла наибольшее применение на практике. Она образуется от центра, и при повороте радиуса-вектора вокруг оси его величина увеличивается пропорционально углу поворота. Отсюда уравнение архимедовой спирали в полярных координатах имеет вид

$$R_i = a\varphi_i, \quad (8.9)$$

где R_i – значение радиуса-вектора при его повороте на угол φ_i ; a – коэффициент пропорциональности.

Профиль кулачка по архимедовой спирали можно весьма просто получить на любом токарном станке при поперечной подаче резца, которая кинематически согласована с вращением шпинделя станка.

Уравнение (8.9) можно записать также в виде

$$R_i = \frac{A_a}{2\pi} \varphi_i, \quad (8.10)$$

где A_a – характеристика (шаг) архимедовой спирали (при повороте

радиуса-вектора на один оборот вокруг центра, т.е. на угол $\varphi_i = 2\pi$, величина $R_i = A_a$).

Для любой i -й точки кривой затылования найдем задний угол α_i как угол между нормалью N к радиусу-вектору R_i и касательной к этой кривой. Дополнением до 90° к нему будет угол ψ_i , т.е. $\alpha_i + \psi_i = 90^\circ$. Из аналитической геометрии известно, что $\operatorname{tg} \psi_i$ равен отношению функции (8.9) к ее производной, т.е.

$$\operatorname{tg} \psi_i = \frac{R_i}{R_i'} = \frac{a\varphi_i}{a} = \varphi_i,$$

следовательно,

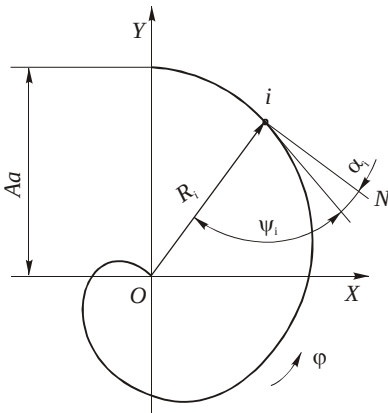


Рис. 8.16. Спираль Архимеда

архимедова спираль с меньшим шагом A_a . Расчеты показывают, что, например, при переточке фрезы диаметром $d = 60$ мм с высотой зуба $h = 10$ мм при повороте передней грани фрезы на 30° от начального положения угол α_v на вершине зуба увеличивается от 9° до $9^\circ 52'$, а у основания зуба – соответственно от $17^\circ 39'$ до $20^\circ 57'$. Таким образом, наибольшее влияние на значение угла α оказывает не переточка, а радиус окружности, на которой лежит точка режущей кромки.

Важным параметром кривой затылования является величина падения затылка k_z , которая зависит от величины заднего угла на вершине зуба фрезы α_v , диаметра фрезы и числа ее зубьев. Как видно из рис. 8.15 и 8.17, величина k_z отсчитывается на передней грани соседнего зуба от точки пересечения ее с кривой затылования до вершины зуба, лежащей на наружной окружности. Заштрихованная часть (рис. 8.13) – это объем металла, удаляемый на вершине зуба при затыловании.

Из рис. 8.17 следует, что величина падения затылка BC на одном зубе, замеренная на его вершине,

$$k_z = d/2 - R_v = d/2 - a\varphi_B, \quad (8.14)$$

где R_v – радиус-вектор архимедовой спирали в точке B .

При этом $d/2 = A_a n$, $\varphi_i = 2\pi n$, если используется участок архимедовой спирали, полученный при n – целом числе оборотов радиуса-вектора или числе шагов спирали (на рис. 8.17 число шагов $n = 2$).

Из рис. 8.17 также следует, что угол поворота радиуса-вектора R_B равен

$$\varphi_B = 2\pi n - \varepsilon,$$

где ε – угловой шаг между зубьями ($\varepsilon = 2\pi/z$).

Из уравнений (8.9) и (8.10) выразим значение коэффициента архимедовой спирали для вершины зуба (точка A)

$$a = \frac{R}{\varphi} = \frac{A_a n}{2\pi n} = \frac{d}{2 \cdot 2\pi n}.$$

Подставив в уравнение (8.14) значения a и φ_B , получим

$$k_z = \frac{d}{2} - \frac{d}{2 \cdot 2\pi n} \left(2\pi n - \frac{2\pi}{z} \right) = \frac{\pi d}{2\pi z n}.$$

Из уравнения (8.12) следует, что задний угол вершинной точки зуба $\text{tg}\alpha_v$ в точке A может быть найден из соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha_B = 1/\varphi_A = 1/2\pi n.$$

Следовательно, величину падения затылка можно выразить как

$$k_z = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_B. \quad (8.15)$$

Аналогичное уравнение для определения k_z можно также найти из треугольника с криволинейными сторонами ABC , рассматривая его приближенно как прямоугольный треугольник, где AC и BC – катеты, угол $ACB = 90^\circ$. В этом случае $AC = \pi d / z$ – окружной шаг зубьев, а катет $BC = k_z$, α_B – задний угол при вершине треугольника в точке A . Отсюда величина падения затылка равна

$$k_z = BC = AC \operatorname{tg} \alpha_B = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_B.$$

Значение k_z указывают на кулачках для затылования. Зная диаметр и число зубьев фрезы и задавшись необходимым значением угла α_B , подбирают нужный кулачок по величине k_z , рассчитанной по уравнению (8.15). Кулачки для оснащения затыловочных станков изготавливают серийно комплектами с $k_z = 0,5 \dots 12,0$ мм (через 0,25 мм для фрез малых диаметров, через 0,5 мм – для фрез средних диаметров и через 1...2 мм – для фрез больших диаметров).

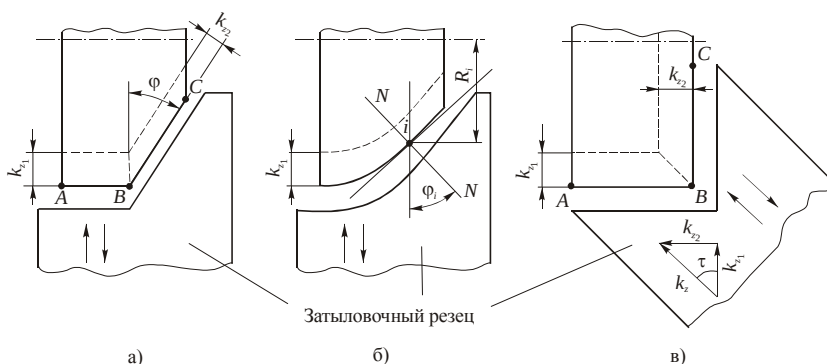


Рис. 8.18. Задние углы α_N на участках режущих кромок, непараллельных оси фрезы: a – на наклонном прямом участке (прямое затылование); b – на криволинейном участке; v – на участке, перпендикулярном оси фрезы (наклонное затылование)

Задние углы на участках режущих кромок, наклонных к оси фрезы. Приведенные выше формулы для расчета задних углов получе-

ны в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, т.е. они справедливы только для участков режущих кромок, параллельных ее оси. Найдем их значения α_N в нормальных сечениях на участках, наклонных к оси, в том числе криволинейных. Знать эти углы крайне необходимо, так как от угла α_N зависит работоспособность всей фрезы. На рис. 8.18 показана фреза с ломаной режущей кромкой, часть которой AB параллельна оси, а участок BC наклонен. При этом угол наклона φ между нормалью к оси и режущей кромкой может меняться в пределах от 0 до 90°.

Если затыловочный резец совершает возвратно-поступательное перемещение в радиальном направлении (прямое затылование), то на участке AB величина падения затылка равна

$$k_{z_1} = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_1,$$

а на участке BC

$$k_{z_2} = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_{N_2}.$$

Так как $k_{z_2} = k_{z_1} \sin \varphi$, то из соотношения этих уравнений следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha_{N_2} = \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \varphi.$$

С учетом переменного значения радиуса в любой i -й точке наклонного участка режущей кромки

$$\operatorname{tg} \alpha_{N_i} = \frac{R}{R_i} \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \varphi. \quad (8.16)$$

Из уравнения (8.16) следует, что при $\varphi \rightarrow 0$ угол α_i уменьшается и на участках режущей кромки, перпендикулярных оси, будет равен нулю. При малых значениях угла φ угол α_i должен быть не менее 2...3°, а в исключительных случаях – не менее 1,0...1,5°.

Если наклонные участки имеют криволинейную (выпуклую или вогнутую) форму, то для определения α_{N_i} она заменяется касательной (рис. 8.18, б) и расчет ведется по уравнению (8.16) с учетом значения угла наклона φ_i этой касательной.

В случае, когда участок кромки BC перпендикулярен оси (рис. 8.18, в), то во избежание нулевых значений угла α применяют наклонное затылование, которое заключается в изменении направления перемещения

затыловочного резца от прямого радиального в наклонное к оси фрезы. Угол поворота суппорта затыловочного станка τ найдем на рис. 8.18, в, задаваясь необходимыми значениями углов α_1 и α_2 и, соответственно, величинами k_{z_1} и k_{z_2} .

Как видно из рис. 8.18, в

$$k_{z_1} = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_1; \quad k_{z_2} = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_2; \quad k_z = \sqrt{k_{z_1}^2 + k_{z_2}^2};$$

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{k_{z_2}}{k_{z_1}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}. \quad (8.17)$$

8.5. Определение профиля затыловочного резца для фрез с положительным передним углом

Затылованные фрезы большей частью изготавливают с передним углом $\gamma = 0^\circ$. Это делается с целью упрощения изготовления, переточки и контроля профиля режущих кромок, а также с целью снижения биеения зубьев при переточке. В то же время при обработке многих материалов это приводит к увеличению сил резания, снижению стойкости фрез и повышению шероховатости обработанной поверхности. Поэтому при фрезеровании ряда труднообрабатываемых материалов необходимо применять затылованные фрезы с положительным передним углом. Для устранения возможных при этом погрешностей профиля деталей необходимо проводить коррекционные расчеты по определению профиля фрезы и, соответственно, профиля затыловочных резцов в осевом (диаметральном) сечении, в котором производится процесс затылования. Для контроля профиля фрезы с помощью шаблона необходимо также определить профиль фрезы в плоскости передней грани.

Рассмотрим решение этих задач на примере фасонной дисковой фрезы, предназначенной для фрезерования прямой канавки.

Из расчетной схемы (рис. 8.19) видно, что дно канавки обрабатывается вершинной режущей кромкой, к которой принадлежит точка 1, а боковые стороны канавки – режущими кромками фрезы 1–2'. Точка 2' фрезы при вращении вокруг оси по окружности радиуса R_2 обрабатывает точку 2 заготовки. Проведем через точку 2' фрезы архимедову спираль, эквидистантно расположенную относительно спирали, которая проходит через точку 1. В осевом (радиальном) сечении OZ найдем высоту зуба фрезы h_{ϕ_2} и перенесем ее в аналогичное сечение OI путем смещения точки 2' по архимедовой спирали.

Эти величины заданы в условиях задачи. Необходимо найти угол φ_2 , выразив его через высоту профиля $h_{д_2}$. Для этого опустим из центра O перпендикуляр OC на продолжение передней грани фрезы и найдем передний угол γ_2 в точке $2'$, то есть угол между радиусом $R_2 = R - h_{д_2}$ и передней гранью. Из треугольника OIC определим, что

$$OC = R \sin \gamma = R_2 \sin \gamma_2.$$

Следовательно,

$$\sin \gamma_2 = \frac{R \sin \gamma}{R_2} = \frac{R \sin \gamma}{R - h_{д_2}}. \quad (8.19)$$

Так как угол γ_2 является внешним углом треугольника $O12'$, то

$$\gamma_2 = \gamma + \varphi_2.$$

Следовательно,

$$\varphi_2 = \gamma_2 - \gamma. \quad (8.20)$$

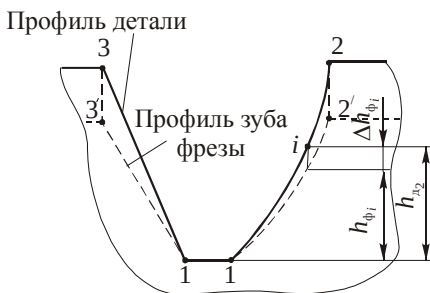


Рис. 8.20. Совмещение профилей детали и зуба фрезы при криволинейном профиле стенок канавки

Таким образом, зная по профилю детали значение $h_{д_2}$, по уравнению (8.19) найдем значение угла γ_2 , а по уравнению (8.20) – значение угла φ_2 . Затем по уравнению (8.18) найдем величину коррекции профиля $\Delta h_{ф_2} = k_1$. Отложив ее по высоте от $h_{д_2}$, можно построить профиль фрезы в осевом сечении, соединив точку 2 фрезы с точкой 1. При этом учитывают, что размеры

профиля вдоль оси у детали и фрезы совпадают.

Размеры профиля фрезы вдоль передней грани получим из треугольника OIC :

$$h_{ф_2}^{\text{пр}} = R \cos \gamma - R_2 \cos \gamma_2 = R(\cos \gamma - \cos \gamma_2) + h_{д_2} \cos \gamma_2. \quad (8.21)$$

Если стенки канавок криволинейны (рис. 8.20), то для построения профиля требуется найти высотные координаты нескольких промежуточ-

ных точек. Для любой i -й точки можно воспользоваться уравнениями (8.18)...(8.21), сменив в них индекс 2 на индекс i . При этом кривая профиля фрезы будет отличаться от кривой профиля изделия. Для упрощения ее можно аппроксимировать более технологичной кривой, например дугой окружности в пределах допуска на погрешность профиля.

Значения передних и задних углов, принятые при расчете таких фрез, обычно задаются в следующих пределах: $\gamma = 10...20^\circ$, $\alpha_b = 8...10^\circ$.

Профилирование дисковых фасонных фрез для обработки винтовых канавок представляет более сложную задачу. Подробно ее решение изложено в [20, 22 и др.].

8.6. Фрезы с двойным затылованием зубьев

При изготовлении точных фасонных деталей, например резьбовых, зубчатых и шлицевых, применяются фрезы со шлифованным профилем. В этом случае шлифовальный круг правят в соответствии с профилем фрезы в диаметральной плоскости (рис. 8.21). Обычно фрезы берут с углом $\gamma = 0$. Круг по диаметру выбирают таким, чтобы он имел достаточную стойкость и запас на износ ($d \geq 80$ мм) и чтобы при этом в конце затылования он не касался профиля соседнего зуба.

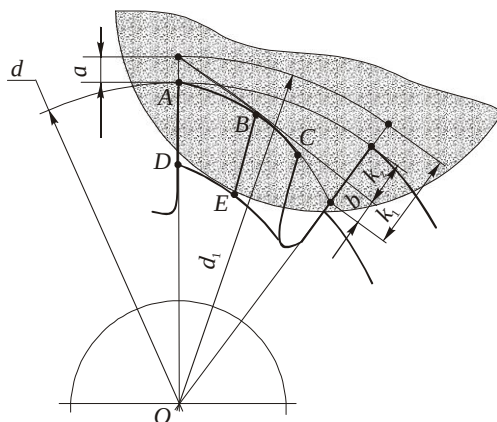


Рис. 8.21. Зуб фрезы с двойным затылованием

Так как полностью шлифовать профиль зуба по всей его длине AC не удастся, то во избежание образования седловины на нешлифованной части последнюю предварительно занижают относительно шли-

фованной части путем затылования резцом с величиной падения затылка k_1 большей, чем при затыловании шлифовальным кругом с величиной падения затылка $k = \frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \alpha_b$. При этом $k_1 = (1,50 \dots 1,75)k$ и данная величина должна быть отнесена к условному диаметру $d_1 > d$ фрезы. Если шлифованная часть зуба составляет половину его длины, то $d_1 = d + 2a$, где $a = b = 0,5(k - k_1)$. Вначале затылования резец срезает припуск на вершине зуба от точки B до C , а затем уже шлифовальным кругом затылуется боковая поверхность $ABED$.

8.7. Конструктивные параметры дисковых фрез с затылованными зубьями

К этим параметрам относятся: диаметры наружный d и отверстия под оправку d_o , высота H и длина C затылка зуба, число зубьев z , формы впадин и канавок между зубьями (рис.8.22).

Диаметр наружной окружности

$$d = d_1 + 2H,$$

где d_1 – диаметр окружности впадин; H – полная высота зуба.

Диаметр окружности впадин принимают

$$d_1 = (0,16 \dots 0,2)d_o, \quad (8.22)$$

где d_o – диаметр посадочного отверстия (определяется из условий прочности и прогиба оправки).

В уравнении (8.22) меньшее значение коэффициента берется для фрез меньших диаметров.

Высота зуба

$$H = h + k_z + r,$$

где h – высота рабочего участка зуба фрезы, равная высоте профиля детали; k_z – величина падения затылка; r – радиус закругления у впадины зуба (необходим для предотвращения трещин при термообработке и для выхода затыловочного резца).

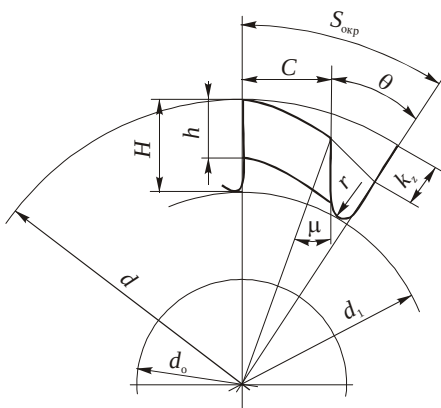


Рис. 8.22. Конструктивные параметры фрезы с затылованными зубьями

Дисковые фрезы изготавливают в диапазоне диаметров 40...230 мм ($d_o = 16...50$ мм, $r = 1...5$ мм). Число зубьев z выбирают исходя из условий обеспечения необходимой прочности зубьев и наибольшего числа переточек по передней грани, а также образования необходимого пространства для размещения стружки. При этом

$$z = \pi d / S_{\text{окр}},$$

где $S_{\text{окр}}$ – окружной шаг зубьев (для чистовых фрез $S_{\text{окр}} = (1,3...1,8)H$, для черновых фрез – $S_{\text{окр}} = (1,8...2,5)H$).

В отличие от фрез с остроконечным зубом, у фрез с затылованным зубом число зубьев с увеличением диаметра уменьшается. Это объясняется тем, что высота H , длина затылка зуба C и $S_{\text{окр}}$ растут быстрее, чем диаметр фрезы d . При этом длина затылка $C = (0,8...1,0)H$.

В табл. 8.1 приведены ориентировочные данные по соотношению z и d у фрез с затылованными зубьями.

Таблица 8.1

Число зубьев фрез с затылованным профилем

d , мм	40...45	50...55	60...75	80...105	110...125	$\frac{130...140}{0}$	150...230
z	16	14	12	11	10	9	8

Исключение составляют фрезы для обработки деталей с неглубоким профилем (резьбонарезные и пазовые фрезы), у которых с увеличением диаметра величины H и $S_{\text{окр}}$ растут в меньшей степени, поэтому число зубьев z увеличивается с увеличением диаметра.

Профиль стружечной канавки определяется углами $\theta = 18...30^\circ$ и $\mu = 15...20^\circ$. После предварительного прочерчивания значение угла θ уточняется, т.е. берется значение этого угла, ближайшее из ряда значений, принятых для стандартных угловых фрез, которые применяются для нарезания канавок.

Величина падения затылка k_z указывается для вершинной точки зуба. При этом задний угол α_v в этой точке обычно берется равным $10...12^\circ$. Чтобы обеспечить необходимые задние углы на боковых наклонных участках режущих кромок в пределах $\alpha = 1...2^\circ$, задний угол иногда увеличивают до $\alpha_v = 16...17^\circ$, хотя это и ведет к ослаблению зуба.

Форма основания впадин зубьев в осевом сечении фрезы выбирается с учетом формы фасонной режущей кромки (рис.8.23).

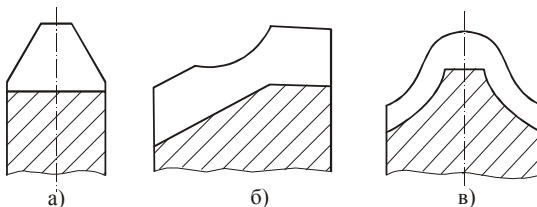


Рис. 8.23. Формы оснований впадин зубьев вдоль осей затылованных фрез

При симметричном профиле, большой его высоте и малой ширине основание впадины обычно берется параллельным оси. Однако в большинстве случаев с целью увеличения прочности зубьев дно впадины оформляют под одним (рис.8.23, а), а также несколькими углами (рис.8.23, б) или фасонным (рис. 8.23, в). При этом профиль впадины подбирают таким, чтобы высота зуба в разных сечениях была минимальной и технологичной при фрезеровании.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные типы фрез и их конструктивные отличия.
2. Типы зубьев фрез. Их применяемость.
3. Конструктивные особенности фрез, оснащенных сменными неперетачиваемыми пластинами. Как осуществляется базирование и крепление СМП у фрез различных типов?
4. В чем суть и назначение способа затылования зубьев фрез?
5. Как определить величину падения затылка у фрез, затылованных по архимедовой спирали, в том числе на участках режущих кромок, наклонных к оси инструмента?
6. Как рассчитывается профиль фасонной затылованной фрезы, имеющей положительный передний угол?
7. Укажите достоинства и недостатки фрез с затылованными зубьями. Конструктивные параметры дисковых фрез с затылованными зубьями.
8. Почему фрезы с остроконечными зубьями обеспечивают большую производительность, чем фрезы с затылованными зубьями?

9. РЕЗЬБООБРАЗУЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

В современном машиностроении почти половина всех деталей имеет резьбу, которую можно классифицировать, например, по следующим признакам: а) расположение резьбовой поверхности на детали – резьбы наружные и внутренние; б) наклон образующей резьбы – цилиндрические и конические; в) форма профиля резьбы – остроугольная метрическая и дюймовая, трапецеидальная, трубная, круглая, упорная и т.п.

Чаще всего резьба используется для крепежных целей, а также и для передачи движения (ходовые винты и гайки). Она имеет сложную винтовую поверхность, к которой предъявляются высокие требования по точности, шероховатости и прочности.

Инструменты для образования резьбы весьма разнообразны по конструкции. Их можно разделить на три группы: 1) лезвийные инструменты, формирующие резьбу путем снятия припуска режущими кромками; 2) бесстружечные инструменты, формирующие резьбу методом холодного пластического деформирования; 3) абразивные инструменты, работающие методом вышлифовывания профиля резьбы.

На практике наибольшее применение нашли инструменты первых двух групп. К ним относятся: резцы, гребенки, фрезы, метчики, плашки, резьбонарезные головки. Анализ конструкций этих инструментов в основном и посвящен данный раздел. Менее подробно будут рассмотрены инструменты второй группы, к которой относятся плашки, ролики, накатники и резьбонакатные головки. Инструменты для вышлифовки резьбы в виде абразивных кругов здесь не рассматриваются по причине простоты конструкции и существенно меньшей применяемости.

9.1. Резьбовые резцы и гребенки

Резьбовые резцы применяются для нарезания всех видов резьб и обладают следующими достоинствами: простотой конструкции, технологичностью и универсальностью. Последнее достоинство заключается в

том, что одним и тем же резцом можно нарезать на цилиндрической и конической поверхностях наружную и внутреннюю резьбы различного диаметра и шага.

Резьбовые резцы работают по методу копирования, поэтому профиль их режущих кромок должен соответствовать профилю впадины нарезаемой резьбы. С целью повышения производительности иногда используется также генераторная схема резания.

Удаление припуска в процессе резьбонарезания производится в условиях несвободного резания при большой степени деформации снимаемого материала. При этом формирование резьбы осуществляется, как правило, за несколько проходов при малых сечениях срезаемой стружки. В связи с этим производительность процесса резьбонарезания низка, поэтому резьбовые резцы в основном применяются в единичном и мелкосерийном производствах.

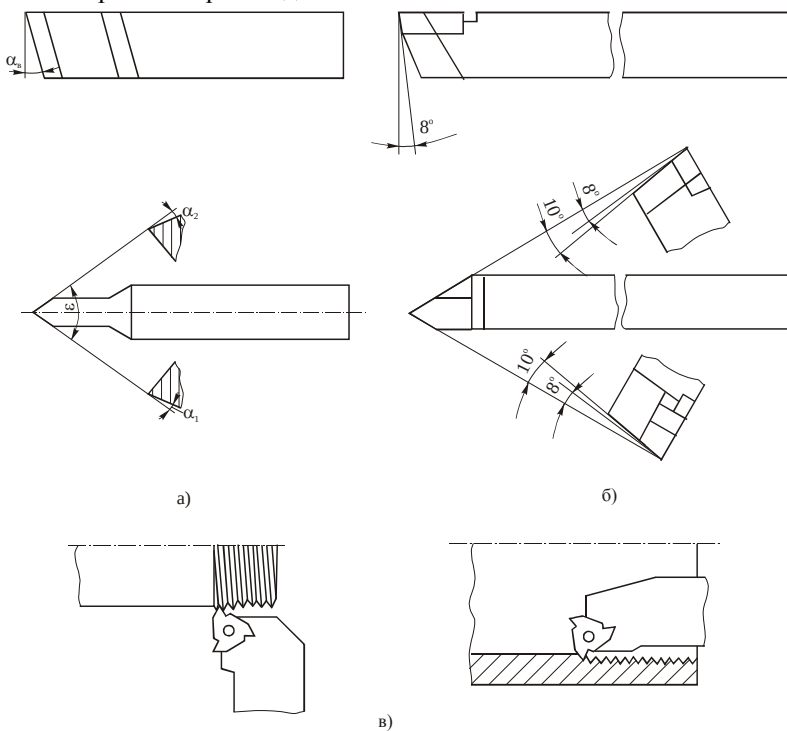


Рис. 9.1. Типы стержневых резьбовых резцов: а – из быстрорежущей стали; б – с напайной твердосплавной пластиной; в – с механическим креплением твердосплавной пластины

Являясь фасонным инструментом, резьбовые резцы могут быть трех типов: стержневые, призматические и круглые.

На рис. 9.1 представлены типовые конструкции резьбовых резцов **стержневого** типа: цельный из быстрорежущей стали; с напайной твердосплавной пластиной; с механическим креплением твердосплавной пластины специальной формы, применяемой для нарезания наружной и внутренней резьб.

От обычных токарных резцов резьбовые резцы отличаются формой головки и профилем режущих кромок. Передний угол для простоты переточки берется $\gamma = 0$. Задние углы на боковых режущих кромках в статике $\alpha_1 = \alpha_2$. При черновом резьбонарезании задние углы равны $4 \dots 6^\circ$, а при чистовом – $8 \dots 10^\circ$. На вершине резца угол $\alpha_v = 15 \dots 20^\circ$.

При нарезании резьб малого диаметра с большой глубиной профиля или многозаходных резьб с большим углом подъема резьбы ($\tau > 3 \dots 4^\circ$) необходимо учитывать влияние этого угла на величину фактических задних и передних углов, отличающихся от замеренных в статическом состоянии вне станка.

Как видно из рис. 9.2, а, при нарезании правозаходной резьбы и установке передней грани резца в осевой плоскости заготовки в сечении резца плоскостью, параллельной оси, на величину передних и задних углов боковых режущих кромок в кинематике оказывает влияние угол τ :

$$\gamma_1 = +\tau; \gamma_2 = -\tau; \alpha_1 = \alpha_{ст} - \tau; \alpha_2 = \alpha_{ст} + \tau; \tau = P/\pi d,$$

где $\alpha_{ст}$ – задние углы на боковых режущих кромках в статике; P – шаг резьбы; d – диаметр резьбы.

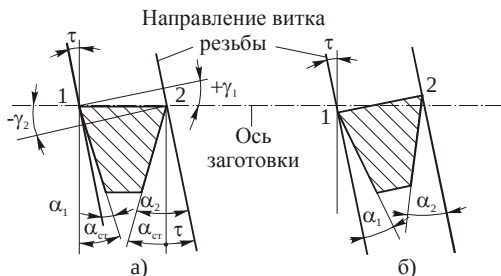


Рис. 9.2. Схемы установки стержневых резцов при нарезании резьб с большим углом τ подъема витков:

а – передняя грань расположена в осевой плоскости заготовки; б – передняя грань расположена перпендикулярно к виткам резьбы

На правой режущей кромке из-за отрицательного переднего угла условия резания ухудшаются и ослабляется режущий клин. На левой кромке уменьшается задний угол, что приводит к снижению стойкости инструмента.

Строго говоря, угол τ изменяется по длине боковых режущих кромок, т.е. он больше во впадине резьбы и меньше на наружном диаметре. Но это изменение угла τ заметно только на резьбах с большой глубиной профиля, например трапецидальных, и несущественно для остроугольных крепежных резьб. В последнем случае в вышеуказанную формулу подставляют значение d_2 среднего диаметра резьбы.

При установке передней грани резца в плоскости, перпендикулярной к виткам резьбы (рис. 9.2, б),

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 0 \text{ и } \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{\text{ст}},$$

т.е. условия резания становятся одинаковыми, но несколько искажается профиль нарезанной резьбы, у которой вместо архимедовой винтовой поверхности витков получается конволютная винтовая поверхность и их осевые сечения не совпадают. Поэтому первый способ установки резцов применяют на чистовых операциях с корректировкой задних углов при больших углах τ , а второй – на черновых операциях.

При многопроходном нарезании остроугольной резьбы резцами образование профиля резьбы может осуществляться по трем схемам (рис. 9.3): а) профильной – с радиальной подачей резца; б) генераторной – с подачей резца под углом к оси заготовки; в) комбинированной, состоящей из подачи под углом при черновой обработке и радиальной подачи – при чистовой (окончательной) обработке.

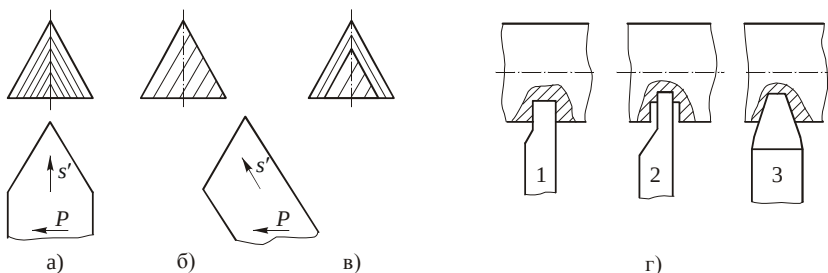


Рис. 9.3. Схемы резания, применяемые при нарезании резьбы: а – профильная; б – генераторная; в – комбинированная; г – для нарезания трапецидальной резьбы

Достоинством генераторной схемы является увеличение толщины срезаемого слоя за один проход в 2 раза, что обеспечивает соответствующее сокращение проходов. Правая кромка в этом случае работает как вспомогательная кромка, оставляя ступеньки на обработанной поверхности. Этот недостаток позволяет исправить применение комбинированной схемы.

При нарезании резьб с глубоким профилем, например трапециевидных, формирование резьбы на предварительных операциях осуществляют резцами с разным профилем режущих кромок, как показано на рис. 9.3, з.

Стержневые резцы обычно имеют небольшой запас на переточку и их установка относительно заготовки связана с определенными трудностями, которые не возникают при использовании фасонных призматических и круглых резьбонарезных резцов.

Призматические резцы (рис. 9.4, а, б) крепятся в стержневой державке с наклоном под углом α , который достигает 15° . С целью сниже-

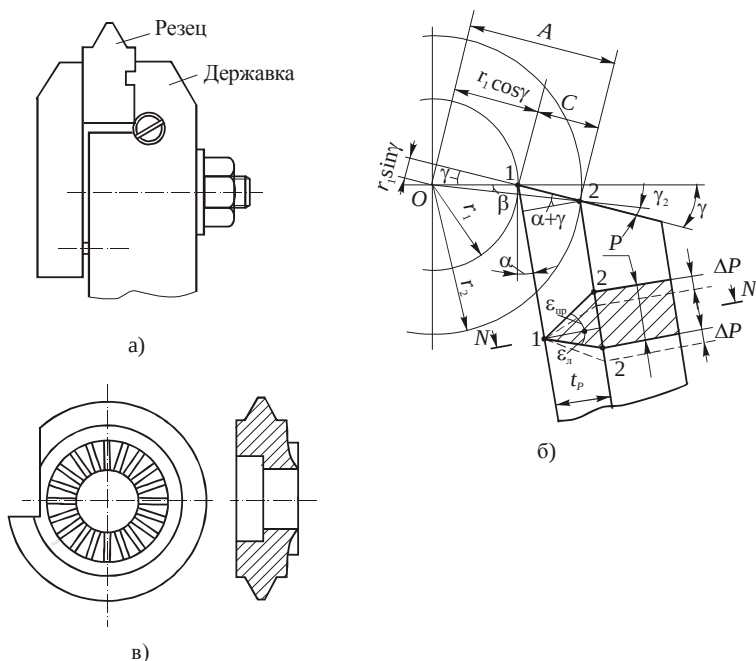


Рис. 9.4. Фасонные резьбовые резцы: а – призматический; б – расчетная схема коррекции профиля призматического резца с $\gamma > 0$; в – круглый

ния сил резания передний угол γ устанавливают в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Если угол $\gamma > 0$, то при расчете профиля режущей части в сечении, перпендикулярном к задней грани, вводят коррекцию на винтовое положение обработанных поверхностей канавки резцы.

На рис. 9.4, б приведена расчетная схема призматического резца с $\gamma > 0$, из которой следует, что точка 2 профиля резца при повороте на угол β относительно осевой плоскости заготовки смещается одновременно вдоль оси на величину ΔP – доли шага резцы.

Так как передний угол γ в точке 1 является углом внешним и не смежным с внутренними углами треугольника $O12$, то угол $\beta = \gamma - \gamma_2$. Из расчета фасонных резцов (2.1) известно, что передний угол в точке 2 равен

$$\sin \gamma_2 = \frac{r_1}{r_2} \sin \gamma.$$

Величину смещения ΔP точки 2 вдоль оси заготовки найдем из соотношения углов поворота β и 2π и соответствующих им смещений вдоль оси:

$$\frac{P}{2\pi} = \frac{\Delta P}{\beta}, \text{ отсюда } \Delta P = \frac{P}{2\pi} \beta.$$

Таким образом, профиль резца в плоскости $N-N$ получается несимметричным, а углы профиля с левой $\varepsilon_{\text{л}}$ и правой $\varepsilon_{\text{пр}}$ сторон не равны, т.е

$$\operatorname{tg} \varepsilon_{\text{л}} = \frac{P}{2} - \Delta P / t_p, \quad \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{P}{2} + \Delta P / t_p.$$

Высота профиля резцы t_p может быть найдена из расчетной схемы в следующей последовательности:

$$t_p = C \cos(\alpha + \gamma).$$

Размеры по передней грани

$$C = A - r_1 \cos \gamma;$$

$$A = \sqrt{r_2^2 - r_1^2 \sin^2 \gamma}.$$

После подстановки значений C и A получим

$$t_p = \left(\sqrt{r_2^2 - r_1^2 \sin^2 \gamma} - r_1 \cos \gamma \right) \cos(\alpha + \gamma).$$

Круглые резцы (рис. 9.4, в) более технологичны в изготовлении, чем призматические, но имеют меньший запас на переточку и менее жесткое крепление. Для создания задних углов центр резца устанавливается выше центра заготовки. Расчет профиля таких резцов подобен расчету круглых фасонных резцов с учетом коррекции, показанной на примере расчета призматического резца с $\gamma > 0$.

Гребенки (рис. 9.5) – это многониточные фасонные резцы, которые могут быть стержневыми; призматическими; круглыми. Их используют главным образом для нарезания крепежных резьб с мелким шагом, т.е. резьб с небольшой высотой профиля.

Как показано на рис. 9.5, з, режущая часть гребенок состоит из заборной части длиной ℓ_1 , заточенной под углом φ к оси и калибрующей части ℓ_2 :

$$\ell_1 = (1,5 \dots 2,0)P, \quad \ell_2 = (3 \dots 6)P,$$

где P – шаг резьбы.

Угол заборной части $\varphi = 25 \dots 30^\circ$, благодаря чему нагрузка распределяется между несколькими режущими кромками зубьев. Поэтому число рабочих ходов при нарезании резьбы уменьшается в 2...3 раза по

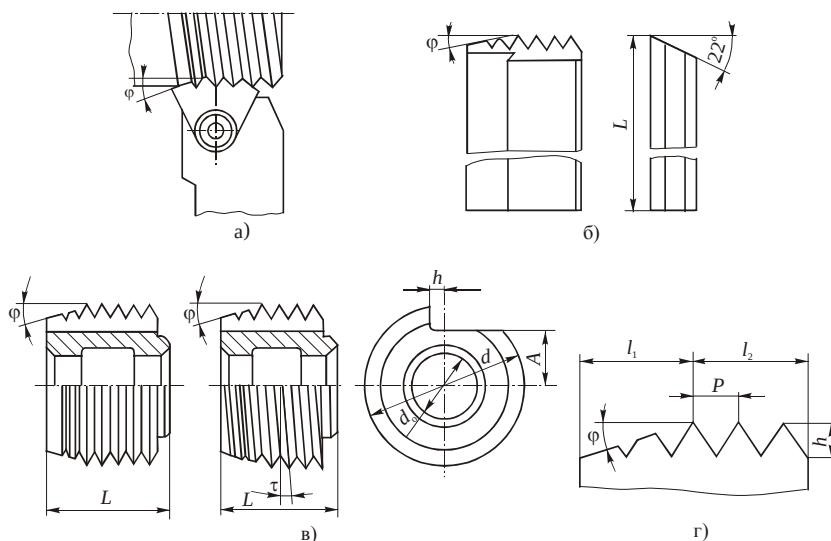


Рис. 9.5. Резьбонарезные гребенки: а – стержневая с механическим креплением твердосплавной пластины; б – призматическая; в – круглая; г – рабочая часть гребенки

сравнению с резбовыми резцами. При нарезании резьбы за один проход длину заборной части увеличивают до $\ell_1 = (3...4)P$.

В начале рабочего хода гребенка имеет радиальную подачу на врезание и затем перемещается вдоль оси вращающейся заготовки с подачей на один оборот, равной шагу.

Стержневые гребенки можно изготавливать цельными или с механически закрепляемыми специальными твердосплавными пластинами. Один из вариантов такой гребенки схематично показан на рис. 9.5, а.

У **призматических гребенок** (рис. 9.5, б) задний угол создается за счет наклона гребенки в державке, аналогично призматическим резцам.

Круглые гребенки (рис. 9.5, в) могут быть двух типов: 1) с кольцевыми витками; 2) с винтовыми витками. Они используются как для нарезания наружной, так и внутренней резьбы. При этом если канавки кольцевые, то ось гребенки должна быть наклонена к оси заготовки под углом подъема резьбы τ . У гребенок с винтовыми канавками направление резьбы должно быть обратное направлению витков нарезаемой наружной резьбы. При нарезании внутренней резьбы направления витков гребенки и резьбы совпадают. Для уменьшения искажения профиля нарезаемой резьбы передний угол равен $\gamma = 0$, а задний угол создается за счет превышения центра гребенки над центром заготовки.

9.2. Резьбонарезные фрезы

В практике машиностроения применяются следующие основные виды резьбонарезных фрез: гребенчатые, дисковые и головки для вихревого нарезания резьбы. Применение фрезерования вместо точения при нарезании наружной и внутренней резьб обеспечивает значительное повышение производительности за счет: 1) использования многозубого инструмента с большой суммарной активной длиной режущих кромок, одновременно снимающих стружку (гребенчатые фрезы); 2) увеличения толщины среза на один зуб (дисковые фрезы); 3) увеличения скорости резания за счет оснащения резцов твердым сплавом (головки для вихревого нарезания резьбы).

Гребенчатые фрезы (рис. 9.6) применяются для нарезания остроугольных наружных и внутренних резьб с мелким шагом на цилиндрических и конических поверхностях заготовок. По сути, они представляют собой набор дисковых фрез, выполненных заодно целое на одном корпусе с профилем зубьев, соответствующим профилю резьбы. Поэтому канавки между фрезами кольцевые. Для образования зубьев вдоль оси фрезы прорезаны либо прямые, либо винтовые стружечные канавки. Для образования задних углов зубья затылуют по архимедовой спирали.

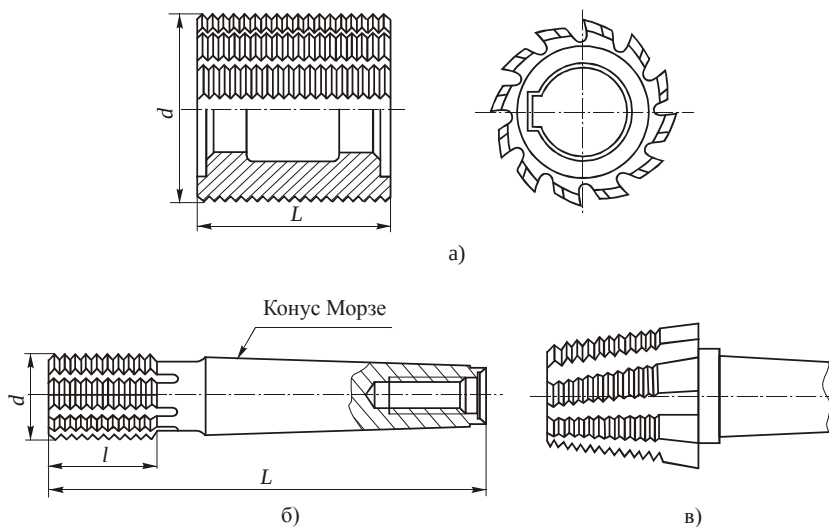


Рис. 9.6. Гребенчатые резбонарезные фрезы: а – цилиндрическая насадная; б – цилиндрическая концевая; в – для нарезания конических резьб

Схема резбофрезерования наружной резьбы цилиндрической гребенчатой фрезой представлена на рис. 9.7. Здесь ось фрезы устанавливается параллельно оси заготовки. Фреза вращается вокруг своей оси со скоростью v_ϕ , определяемой стойкостью инструмента, и в начальный момент врезается с радиальной подачей $s_p = s_z z n_\phi$. После чего она перемещается на величину одного шага резьбы P вдоль оси заготовки с подачей $s_{np} = P$. При этом заготовка медленно поворачивается на $1 \dots 1\frac{1}{4}$ оборота. Здесь перебег, равный $\frac{1}{4}$ оборота, совершается для компенсации пути врезания инструмента на заданную глубину профиля резьбы.

Соотношение между числами оборотов детали n_d и фрезы n_ϕ определяется по следующим формулам:

$$n_d = \frac{n_\phi s_z z}{\pi d_2}; \quad n_\phi = \frac{1000 v_\phi}{\pi d_\phi},$$

где s_z – подача на один зуб фрезы; z – число зубьев (стружечных канавок) на торце фрезы; d_2 – средний диаметр резьбы, мм; d_ϕ – диаметр фрезы, мм.

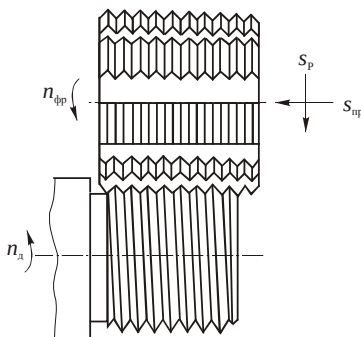


Рис. 9.7. Схема нарезания резьбы гребенчатой фрезой

Для фрез из быстрорежущей стали $v_\phi = 25 \dots 30$ м/мин, для твердосплавных фрез $v_\phi = 60 \dots 120$ м/мин. Подача на зуб выбирается в зависимости от твердости обрабатываемого материала и находится в пределах $s_z = 0,03 \dots 0,15$ мм/зуб.

Недостатком гребенчатых фрез является искажение угла профиля нарезаемой резьбы из-за несовпадения траектории точек режущих кромок фрезы с кривой резьбы, получаемой в сечении, перпендикулярном к оси заготовки. У фрезы это окружность, а у нарезаемой резьбы – архимедова спираль. Однако величина этого искажения мала и достигает $3 \dots 4'$ – для наружной и $7 \dots 9'$ – для внутренней резьбы. Обычно она укладывается в пределы допуска на угол профиля крепежной резьбы с мелким шагом.

К основным конструктивным параметрам гребенчатых фрез относятся: диаметры фрезы d и посадочного отверстия d_o , длина фрезы L , число зубьев (стружечных канавок) z , направление канавок, размеры профиля резьбы (угол профиля α , высота резьбы h , шаг P), высота зуба H , величина падения затылка k_z :

$$d = d_o + 2E + 2H,$$

где E – толщина стенки корпуса фрезы ($E = (0,3 \dots 0,4)d_o$); H – высота зуба фрезы:

$$H = h + k_z + r + e,$$

где k_z – величина падения затылка; r – радиус у основания зуба; e – зазор между впадиной зубьев фрезы и наружным диаметром заготовки.

Диаметры гребенчатых фрез для нарезания наружных резьб берут в пределах $d = 40 \dots 90$ мм через 10 мм в зависимости от шага резьбы, а для внутренних резьб в зависимости от диаметра d_3 отверстия в заготовке $d = (0,85 \dots 0,90)d_3$ в диапазоне $d = 10 \dots 40$ мм через 5 мм. Длина фрезы должна быть больше длины нарезаемой резьбы на 2...3 шага, поэтому $L = 15 \dots 100$ мм. При этом с увеличением длины L возрастает величина искажения резьбы, полученная в результате термообработки.

Число зубьев гребенчатых фрез принимается равным

$$z = 1,57\sqrt{d}.$$

Стружечные канавки прямые или винтовые с углом наклона к оси фрезы $\omega = 5 \dots 15^\circ$. При этом винтовые канавки обеспечивают более равномерную работу фрезы, хотя при этом на боковых кромках зубьев создают разные по величине передние углы: с одной стороны – положительные, а с другой – отрицательные, что ухудшает условия резания.

Так как угол контакта фрезы с заготовкой θ невелик (рис. 9.8), то это вызывает неравномерность нагрузки на зубья фрезы. Поэтому желательно, чтобы в пределах угла θ находилось не менее двух зубьев.

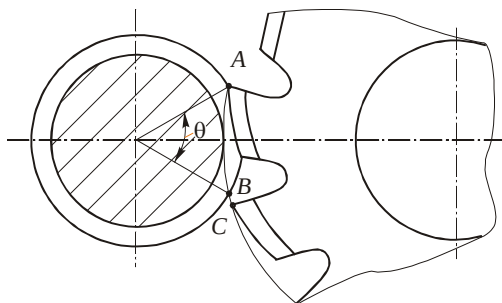


Рис. 9.8. Схема контакта гребенчатой фрезы и заготовки

Задние углы на боковых режущих кромках зубьев зависят от угла на вершине зуба:

$$\operatorname{tg} \alpha_6 = \operatorname{tg} \alpha_b \sin \alpha / 2,$$

где $\alpha/2$ – половина угла профиля резьбы (для метрической резьбы

$\alpha=60^\circ$); α_B – задний угол при вершине зуба (при $\alpha_B=8\dots10^\circ$, $\alpha_G=4\dots5^\circ$).

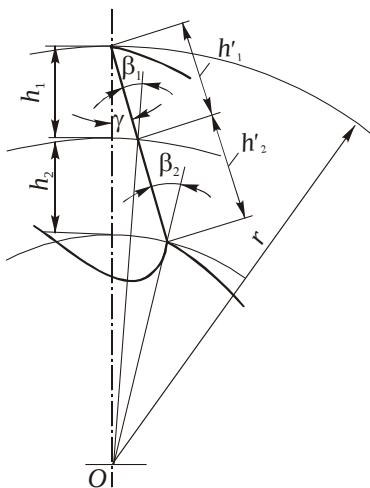


Рис. 9.9. Расчетная схема определения гребенчатой фрезы с $\gamma > 0$

Передний угол у быстрорежущих фрез выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Так, например, для твердых сталей, чугуна, бронзы и латуни рекомендуется брать угол $\gamma = 0$, для сталей средней твердости $\gamma = 3\dots5^\circ$, для цветных металлов и сплавов $\gamma = 10\dots12^\circ$. При положительных передних углах необходимо проводить коррекционные расчеты для определения профиля фрезы в плоскости передней грани, в которой при изготовлении и переточке производится его контроль. При этом следует учесть,

что впадина резьбы фрезы не должна контактировать с наружной поверхностью заготовки. Поэтому минимальная высота ножки резьбы h_2 , отсчитываемая от среднего диаметра, должна быть больше высоты головки резьбы детали, равной $h/2$.

Этот пересчет ведется по формулам, приведенным в технической литературе, причем параметры, использованные в этих расчетах, показаны на рис. 9.9:

- высота головки резьбы на передней грани

$$h'_1 = \frac{(r - h_1) \sin(\beta_1 - \gamma)}{\sin \gamma};$$

- высота ножки резьбы

$$h'_2 = \frac{[r - (h_1 + h_2) \sin(\beta_2 - \beta_1)]}{\sin \beta_1},$$

где β_1, β_2 – углы, рассчитываемые по формулам:

$$\sin \beta_1 = \frac{r \sin \gamma}{r - h_1}, \quad \sin \beta_2 = \frac{r \sin \gamma}{r - (h_1 - h_2)};$$

- полная высота резьбы

$$h = h_1 + h_2;$$

- высота головки резьбы

$$h_1 = h/2 + \delta_{\text{и}};$$

где $\delta_{\text{и}}$ – допуск на износ,

- высота ножки резьбы (с учетом зазора между ножкой резьбы фрезы и наружной поверхностью заготовки)

$$h_2 = h/2 + 0,02 \text{ мм};$$

- половина угла профиля резьбы фрезы

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \frac{(h_1 + h_2) \sin \gamma}{[r - (h_1 - h_2) \sin(\beta_1 - \gamma)]}.$$

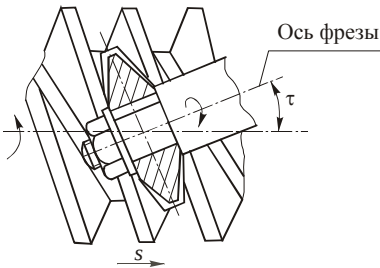


Рис. 9.10. Схема установки дисковой фрезы относительно заготовки

Дисковые фрезы нашли применение при нарезании резьб больших глубин, диаметров и длины. Например, их часто используют при нарезании резьб червяков, ходовых винтов и т.п. Благодаря тому, что фрезы являются многозубыми инструментами, работают с большими подачами и нарезают резьбу за один проход, их производительность по сравнению с резцами значительно выше.

При нарезании резьбы ось оправки дисковой фрезы устанавливается под углом τ к оси заготовки, равным углу подъема резьбы на ее среднем диаметре (рис. 9.10). Фреза совершает вращательное движение, а заготовка – вращательное и поступательное движения вдоль своей оси с подачей на один оборот, равный шагу резьбы.

Дисковые фрезы изготавливаются диаметром 60...180 мм и имеют большое число ($z = 34...40$) остроконечных зубьев. Благодаря этому

обеспечивается высокая производительность и хорошее качество обработанной поверхности. При нарезании трапецидальных резьб с целью снижения сил резания и повышения стойкости фрез широкое распространение получили фрезы (рис. 9.11), у которых на каждой боковой стороне в шахматном порядке через один зуб удалены режущие кромки. Поэтому каждый зуб работает только одной боковой режущей кромкой, но с повышенной в 2 раза толщиной среза. При этом вершинные кромки остаются неизменными, так как на их долю достается толщина среза, в 2 раза большая, чем на боковые кромки. Для контроля профиля зубьев таких фрез после переточки один зуб оставляют с полным профилем.

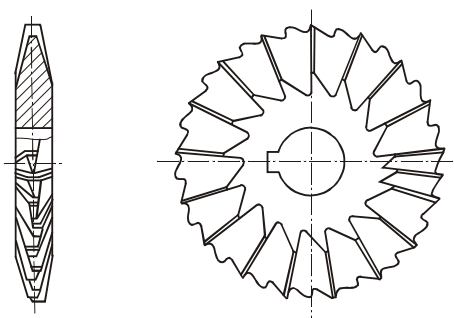


Рис. 9.11. Дисковая фреза для нарезания трапецидальной резьбы

Из-за наклона оси фрезы к оси заготовки и прямолинейности режущих кромок при фрезеровании трапецидальной резьбы на червяках угол профиля резьбы ε_n и толщину зуба b_n на окружности среднего диаметра инструмента рассчитывают по формулам:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_n / 2 = \operatorname{tg} \varepsilon / 2 \cos \tau ;$$

$$b_n = b \cos \tau .$$

Однако эти формулы являются приближенными, так как при более точном расчете оказывается, что профиль резьбы в сечении, нормальном к виткам, не совпадает с профилем зубьев фрезы, который должен быть криволинейным. При малых значениях угла τ возникающая погрешность профиля резьбы невелика, однако при $\tau > 10 \dots 15^\circ$ необходимо иметь более точные значения параметров профиля зубьев в сечениях фрезы и заготовки плоскостями, перпендикулярными к оси оправки. При этом на кривых сечения находят точки касания фрезы и заготовки и по ним строят профиль боковых режущих кромок зубьев фрезы.

Головки для охватывающего («вихревого») фрезерования резьбы применяются в тяжелом машиностроении для скоростного нарезания крупных резьб на ходовых винтах длиной до 10000 мм и диаметром до 1000 мм. Схема головки для охватывающего фрезерования показана на рис. 9.12. Она имеет достаточно сложную конструкцию и устанавливается на суппорте токарного станка с наклоном к оси заготовки под

углом подъема резьбы τ . Головка с установленными в ней твердосплавными резцами охватывает заготовку и приводится во вращение от индивидуального привода со скоростью 100...450 м/мин.

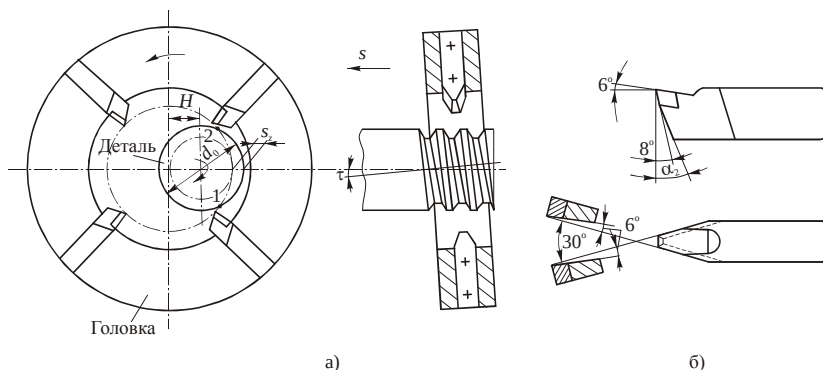


Рис. 9.12. Схемы «вихревого» резьбофрезерования многолезковыми головками:
а – схема головки; б – конструкция резца

Заготовке задается встречное вращение от шпинделя станка с невысокой скоростью. В процессе резания головка перемещается вдоль оси заготовки с подачей на оборот, равной шагу резьбы. Нарезание резьбы обычно производится за один, реже два прохода. В корпусе головки размещаются 2...12 резцов, которые из-за смещения центра ее вращения относительно оси заготовки на величину H вступают в контакт с заготовкой периодически. Поэтому стружка, снимаемая каждым резцом, имеет переменную толщину, равную нулю в точке 1 начала и в точке 2 конца контакта и максимальную толщину в середине между этими точками, равную s_z . Такая форма стружки при ее относительно небольшой длине значительно облегчает условия ее удаления из зоны резания. Процесс фрезерования при этом неравномерный, поэтому требуется повышенная жесткость конструкции корпуса головки во избежание появления вибраций.

Резцы с напайными твердосплавными пластинами (рис. 9.12, б) затачивают под углами $\gamma = 0...6^\circ$, $\alpha_v = 6...8^\circ$ на пластине и под углами $\alpha_2 = 15...20^\circ$ на державке и $\alpha_6 = 6^\circ$ на боковых режущих кромках. Благодаря высоким скоростям резания, хорошей транспортабельной форме стружки, низким радиальным нагрузкам такие головки позволяют нарезать резьбы с высоким качеством поверхности на длинных жестких ва-

лах. При этом производительность в 3...4 раза выше, чем при обычных резьбофрезеровании и точении.

9.3. Метчики

Метчики широко используются в машиностроении для нарезания резьбы в отверстиях заготовок и весьма разнообразны по конструкциям и геометрическим параметрам.

Метчик – это винт, превращенный в инструмент путем прорезания стружечных канавок и создания на режущих зубьях передних, задних и других углов. Для крепления на станке или в воротке он снабжен хвостовиком. Режущая часть метчика изготавливается чаще всего из быстрорежущей стали, реже из твердого сплава.

Условия резания при снятии стружки метчиком очень тяжелые из-за несвободного резания, больших сил резания и трения, а также затрудненных условий удаления стружки. Кроме того, метчики имеют пониженную прочность из-за ослабленного поперечного сечения. Особенно отрицательно это сказывается при нарезании резьбы в вязких материалах метчиками малых диаметров, которые часто выходят из строя из-за поломки, вызванных пакетированием стружки.

Достоинствами метчиков являются: простота и технологичность конструкции, возможность нарезания резьбы за счет самоподачи, высокая точность резьбы, определяемая точностью изготовления метчиков.

По конструкции и применению метчики делят на следующие типы:

- 1) ручные (слесарные) – с ручным приводом, изготавливаются комплектами из двух или трех номеров;
- 2) машинно-ручные одинарные или в комплекте из двух номеров – с ручным или станочным приводом;
- 3) машинные одинарные – со станочным приводом;
- 4) гаечные – для нарезания резьбы в гайках на специальных станках;
- 5) плашечные и маточные – для нарезания и, соответственно, калибрования резьбы в резьбонарезных плашках;
- 6) специальные – для нарезания резьб различных профилей: трапецеидальных, круглых, упорных и т.д., а также сборные регулируемые, метчики-протяжки, конические метчики и др.

Конструктивные элементы метчиков и геометрические параметры режущей части. Несмотря на большое разнообразие типов метчиков, они имеют общие основные части, конструктивные элементы и геометрию режущей части, которые рассмотрим ниже на примере метчиков для нарезания остроугольной крепежной резьбы, получивших наибольшее распространение на практике.

Основными частями метчика (рис. 9.13) являются: режущая (заборная) и калибрующая части, стружечные канавки, число перьев и зубьев, хвостовик с элементами крепления. К геометрическим параметрам относятся: φ – угол заборного конуса, играющий роль угла в плане; γ и α – передний и задний углы на режущих кромках; ω – угол наклона винтовых стружечных канавок; λ – осевой угол подточки передней поверхности.

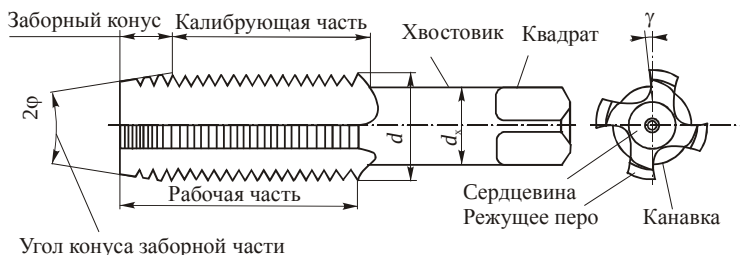


Рис. 9.13. Основные элементы метчика

Режущая часть метчика выполняет основную работу по срезанию припуска, формированию профиля нарезаемой резьбы и удалению стружки из зоны резания. Она определяет точность резьбы и стойкость метчиков.

Для распределения припуска между зубьями режущая часть выполняется на поверхности усеченного конуса, называемого заборным, с углом φ наклона его образующей к оси. Если режущая часть получается путем срезания на конус резьбы исходного винта, то высота зубьев на нем переменная.

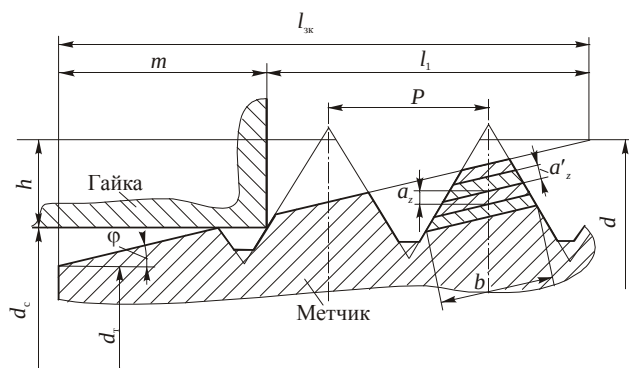


Рис. 9.14. Схема для определения параметров режущей части метчика

При этом зубья на длине режущей части ℓ_1 срезают припуск во впадине резьбы детали по генераторной схеме, т.е. каждый режущий зуб участвует в формировании профиля резьбы (рис. 9.14). Использование такой схемы значительно упрощает технологии изготовления и заточки метчиков.

Известны и другие предложения по оформлению режущей части метчика, например по использованию профильной схемы резания, когда на заборном конусе нарезаются зубья с полным профилем резьбы или в качестве образующей заборной части берется не прямая, а дуга окружности, и др. Хотя эти варианты и позволяют повысить стойкость метчиков и точность нарезаемой резьбы, но они существенно увеличивают трудоемкость изготовления метчиков и поэтому не нашли широкого практического применения. При генераторной схеме резания главными режущими кромками являются вершинные кромки переменной ширины, а боковые кромки зубьев – вспомогательными.

Число режущих зубьев метчика

$$z = z_k n,$$

где z_k – число стружечных канавок; n – число режущих зубьев на одном пере ($n = \ell_1 / P$).

На рис. 9.14 показано, что каждый зуб метчика срезает слой постоянной толщины a_z и переменной ширины b . Строго говоря, толщина среза должна измеряться по нормали к режущей кромке – a'_z . Тогда

$$a_z = a'_z / \cos \varphi.$$

Учитывая малую величину $\varphi = 3 \dots 6^\circ$, можно принять $a_z \approx a'_z$.

При глубине впадины резьбы $h = \ell_1 \operatorname{tg} \varphi$, вырезаемой всеми зубьями метчика, толщина среза, приходящаяся на один зуб, равна

$$a_z = \frac{h}{z_k n} = \frac{\ell_1 \operatorname{tg} \varphi}{z_k n} = \frac{\ell_1 \operatorname{tg} \varphi P}{z_k \ell_1} = \frac{P}{z_k} \operatorname{tg} \varphi. \quad (9.1)$$

Число канавок z_k , а следовательно, и перьев зависит от диаметра метчика, прочности перьев и условий размещения стружки. На практике для машинных метчиков рекомендуются значения z_k в зависимости от диаметра резьбы (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Число канавок метчика в зависимости от диаметра резьбы

d , мм	2...20	22...36	32...52
z_k	2...3	3...4	4...6

Из уравнения (9.1) следует, что чем меньше число канавок при прочих равных условиях, тем больше толщина среза a_z , а следовательно, меньше удельная сила резания. За счет сокращения суммарного объема стружечных канавок метчик имеет больший запас прочности. Однако при этом ухудшается качество обработанной поверхности и снижается точность нарезаемой резьбы. Поэтому малые значения z_k используют только у метчиков малых диаметров, где основными являются требования к прочности метчиков.

На выбор a_z при проектировании метчиков большое влияние оказывают физико-механические свойства обрабатываемого материала: прочность, твердость, вязкость и др. (табл. 9.2).

Предельными являются значения a_z , равные 0,015 и 0,15 мм. При $a_z < 0,015$ мм резание становится затрудненным и даже невозможным, так как в этом случае толщина среза приближается по величине к радиусу скругления режущей кромки и наблюдаются смятие и скобление поверхности резьбы. При $a_z > 0,15$ мм резко повышается шероховатость поверхности резьбы и из-за увеличения силы резания снижается ее точность. Таким образом, при выборе a_z исходят из того, что при уменьшении a_z до определенного предела улучшается качество резьбы, снижаются силы резания, но уменьшается производительность процесса резбонарезания. Поэтому при нарезании качественных резьб берут меньшие значения a_z . Так же поступают и при обработке более прочных и вязких материалов, например жаропрочных и нержавеющей сталей, титановых сплавов и др.

Таблица 9.2

Значения a_z метчика в зависимости от обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал	a_z , мм
Сталь	0,02...0,05
Чугун	0,04...0,07
Цветные металлы и сплавы	0,06...0,15
Труднообрабатываемые стали и сплавы	0,015...0,020

Как видно из уравнения (9.1) и рис. 9.14, изменить величину a_z можно путем изменения угла заборного конуса φ , а следовательно, и длины режущей части метчика, так как

$$\ell_1 = h / \operatorname{tg} \varphi.$$

Для стандартных машинных метчиков рекомендуется $\varphi = 6^\circ 30'$, а для гаечных метчиков $\varphi = 3^\circ 30'$. Такое небольшое значение φ берется также с целью обеспечения лучших условий захода метчика в отверстие. При изменении условий резания величину угла φ , а следовательно, и a_z можно менять путем переточки метчика по заборному конусу.

На окончательный выбор значений параметров φ и a_z оказывают влияние тип отверстия и комплектность метчиков, применяемых для нарезания резьбы.

На рис. 9.15 показаны наиболее часто встречающиеся на практике четыре типа отверстий: сквозные неглубокие и глубокие, глухие с малым и большим пространствами для выхода метчика. Если выразить длину режущей части в шагах P , то при нарезании резьбы в сквозных отверстиях принимают $\ell_1 = 6P$, у гаечных метчиков — $\ell_1 = (6 \dots 12)P$, в глухих отверстиях $\ell_1 = 2P$ и в труднообрабатываемых материалах $\ell_1 = (12 \dots 20)P$.

При нарезании резьбы в сквозных отверстиях, в том числе в гайках, когда длина режущей части равна длине нарезаемой резьбы, возникает наибольшая сила резания, так как при этом суммарная площадь срезаемого припуска будет максимальной. Если же режущая часть короче длины резьбы, то сила резания будет меньше.

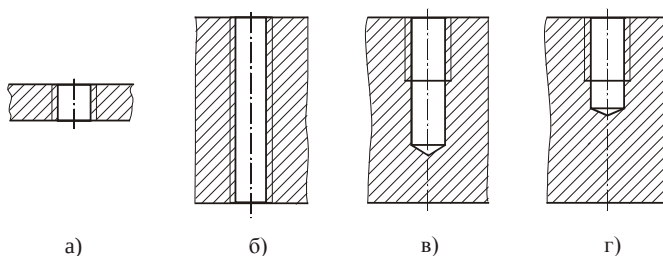


Рис. 9.15. Типы отверстий для нарезания резьбы метчиками: а — короткие сквозные; б — длинные сквозные; в — глухие с глубоким выбегом метчика; г — глухие с неглубоким выбегом метчика

При сокращении размера ℓ_1 сила резания уменьшается за счет увеличения a_z и снижения удельной силы резания, сокращается также машинное время, но ухудшаются условия захода метчика в отверстие. С целью исправления этого недостатка диаметр на переднем торце метчика d_T принимают меньше диаметра отверстия, просверленного под резьбу (рис. 9.14), т.е.

$$d_T = d_c - 2f\ell_{3K} \operatorname{tg} \varphi,$$

где d_c – диаметр сверла; f – коэффициент уменьшения диаметра (для метчиков $d = 2 \dots 30$ мм $f = 0,3 \dots 0,18$, причем большее значение f берется для метчиков меньших диаметров).

Как следует из рис. 9.14, длина режущей части ℓ_1 меньше длины заборного конуса ℓ_{3K} :

$$\ell_1 = \frac{d - d_c}{2 \operatorname{tg} \varphi}. \quad (9.2)$$

Длина заборного конуса с учетом диаметра метчика с торца d_T равна

$$\ell_{3K} = \frac{d - d_T}{2 \operatorname{tg} \varphi}.$$

Найдем длину заборного конуса для заданного диаметра отверстия под резьбу d_c . Так как $\ell_{3K} = \ell_1 - f\ell_1 = \ell_1(1 - f)$, то из уравнения (9.2)

$$\ell_{3K} = \frac{d - d_c}{2 \operatorname{tg} \varphi (1 - f)}.$$

При нарезании резьбы в глухих отверстиях за один проход, как указывалось выше, $\ell_1 = 2P$. В случае применения комплекта из двух метчиков принимают $\ell_1 = 6P$ для чернового метчика и $\ell_1 = 2P$ для чистового метчика. С целью облегчения работы машинных метчиков там, где это допустимо с точки зрения конструкции детали, сверлят отверстие под резьбу на большую глубину по сравнению с требуемой (рис. 9.15, в). Такое отверстие можно нарезать метчиком, предназначенным для сквозных отверстий.

При нарезании резьбы вручную, как правило, трудно удалить весь припуск за один проход. Поэтому приходится его распределять между несколькими метчиками комплекта, который может состоять из двух

или трех номеров. Соответственно ℓ_1 , φ , наружный d и средний d_2 диаметры резьбы будут у них переменными (рис. 9.16).

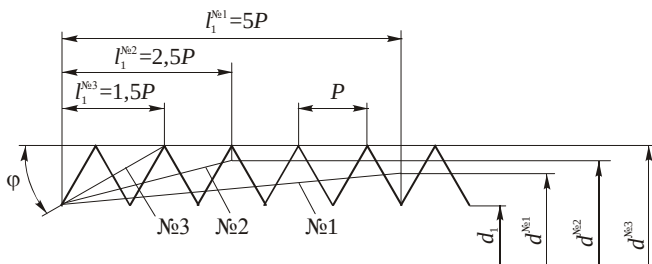


Рис. 9.16. Распределение припуска между метчиками комплекта из трех номеров

В табл. 9.3 приведены рекомендации [13] по распределению объема снимаемого припуска между метчиками комплекта, углы φ , длины режущей части ℓ_1 и нагрузки в процентах на каждый метчик.

Т а б л и ц а 9.3

9.3. Распределение припуска между метчиками комплекта

Номера метчиков в комплекте	Комплект из двух номеров	Комплект из трех номеров
№1 (черновой метчик)	70%; $\varphi = 7^\circ$; $\ell_1 = 6P$	50%; $\varphi = 4^\circ$; $\ell_1 = 5P$
№2 (средний метчик)	--	30%; $\varphi = 10^\circ$; $\ell_1 = 2,5P$
№3 (чистовой метчик)	30%; $\varphi = 20^\circ$; $\ell_1 = 2P$	20%; $\varphi = 20^\circ$; $\ell_1 = 1,5P$

У всех метчиков комплекта внутренний диаметр резьбы d_1 одинаков, а наружный d и средний d_2 диаметры отличаются. Так, например, для комплекта из трех метчиков они равны соответственно

$$d_{(\text{№1})} = d_{(\text{№3})} - 0,5P, \quad d_{(\text{№2})} = d_{(\text{№3})} - 0,15P,$$

где $d_{(\text{№1} \dots 3)}$ – наружный диаметр соответственно метчиков №1...3.

$$d_{2(\text{№1})} = d_{2(\text{№3})} - 0,15P, \quad d_{2(\text{№2})} = d_{2(\text{№3})} - 0,07P,$$

где $d_{2(\text{№1} \dots 3)}$ – средний диаметр соответственно метчиков №1...3.

Геометрические параметры зубьев режущей части метчика показаны на рис. 9.17.

Передний угол γ у зубьев метчика – это угол между касательной к

передней поверхности и радиусом, проведенным в точку режущей кромки, через который проходит основная плоскость. Строго говоря, этот угол изменяется по высоте зуба, так как точки режущих кромок лежат на разных диаметрах, однако для крепежных резьб с небольшой высотой резьбы перепад этих диаметров небольшой и изменение угла невелико.

Учитывая тяжелые условия работы метчика, передний угол γ , как правило, берут положительным. Для обработки сталей средней твердости рекомендуется брать угол $\gamma = 12 \dots 15^\circ$, для хрупких материалов (чугун, бронза, латунь), а также для твердой стали $\gamma = 0 \dots 5^\circ$, для цветных металлов и сплавов $\gamma = 16 \dots 25^\circ$.

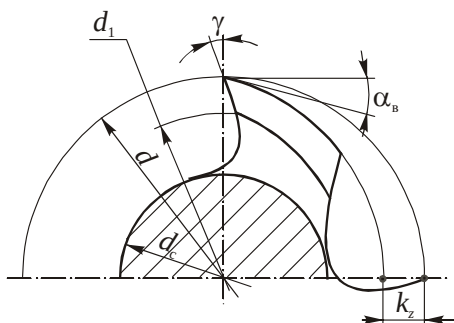


Рис. 9.17. Геометрические параметры режущих зубьев метчика

Задний угол α_B на главных вершинных кромках – это угол между вектором скорости резания, через который проходит плоскость резания, и касательной к задней поверхности. Он создается путем затылования вершинных режущих кромок зубьев по архимедовой спирали. Рекомендуется брать $\alpha_B = 6 \dots 12^\circ$ (меньшее значение берется для ручных метчиков).

Величина падения затылка, измеряемая на радиусе, проведенном в вершину соседнего зуба, равна (по аналогии с затылованными фрезами)

$$k_z = \frac{\pi d}{z_k} \operatorname{tg} \alpha_B.$$

На боковых режущих кромках при генераторной схеме резания задние углы отсутствуют, так как толщины срезаемых слоев небольшие.

Только у метчиков с профильной схемой резания, применяемых для нарезания резьб высокой точности и качества поверхности, используется затылование по всему профилю зубьев.

После затупления метчиков переточка режущих зубьев может производиться как по передней, так и по задней поверхности по схемам, приведенным на рис. 9.18. В случае затылования поворот метчика производится в пределах ширины пера с использованием, например, приспособления, показанного на рис. 9.18, б.

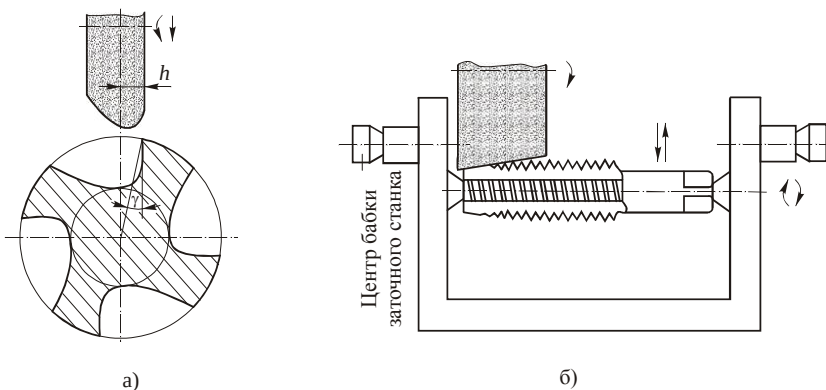


Рис. 9.18. Заточка метчика: а – по передней грани; б – по задней грани

Калибрующая часть метчика, имеющая полный профиль резьбы, предназначена для окончательного формирования нарезаемой резьбы. Она также обеспечивает направление метчика в отверстии, его самоподачу по резьбе, нарезанной заборной частью, а также служит запасом на переточку метчика. Наибольший износ ее зубьев приходится на первый виток после заборной части. В процессе переточки метчика из-за малого значения угла ϕ длина калибрующей части ℓ_2 заметно уменьшается. При назначении размера исходят из следующих соображений: чем больше размер ℓ_2 , тем лучше направление метчика в отверстии, тем точнее нарезаемая резьба и больше запас на переточку, но при этом возрастает крутящий момент трения. Поэтому считается достаточным, если

$\ell_2 = 0,5d$ для средних и крупных и $\ell_2 = (1,2...1,5)d$ для мелких диаметров. При нарезании резьб с мелким шагом длина ℓ_2 может быть увеличена до $(20...40)P$.

Для уменьшения трения и во избежание защемления метчика в отверстии калибрующая часть снабжается обратным конусом по наружному диаметру с уменьшением его на $0,04...0,08$ мм на 100 мм длины. У метчиков со шлифованной резьбой также производится затылование по боковым сторонам витков в пределах $2/3$ ширины пера от его конца на величину падения затылка $k_z = 0,02...0,04$ мм. При этом задний угол на боковых режущих кромках равен $\alpha_6 = 15...20'$. Кроме снижения трения, это способствует устранению налипания мелкой стружки на витки резьбы метчика. У ручных метчиков затылование на калибрующей части не предусматривается.

При нарезании резьб в вязких и особо труднообрабатываемых материалах применяется также срезание зубьев через один в шахматном порядке (см. ниже метчики с шахматным расположением зубьев) с целью снижения сил трения на калибрующей части.

Форма стружечных канавок и перьев метчика оказывает большое влияние на его работоспособность. Объем канавок должен быть достаточным для размещения стружки, особенно при нарезании резьбы в глухих отверстиях. Форма канавки должна способствовать лучшему формированию и отводу стружки из зоны резания.

Часть поверхности канавки является передней гранью зуба, по которой сходит стружка. Она прямолинейна (рис. 9.19, *а*) и обеспечивает постоянство угла вдоль всей длины рабочей части метчика. Другая часть канавки определяет форму спинки зуба. При вывертывании метчика задняя сторона пера может срезать стружку и испортить резьбу. Это наиболее вероятно в том случае, когда форма канавки полукруглая (рис. 9.19, *б*). При прямолинейной спинке угол η между касательной к наружной окружности и спинкой зуба должен быть не менее 75° . Для лучшего скручивания стружки в плотные жгуты чаще всего спинку зуба делают по радиусу (рис. 9.19, *б*), что особенно важно при обработке вязких материалов.

С целью упрощения технологии изготовления основная масса метчиков выпускается с прямыми стружечными канавками, параллельными оси, но в последние годы изготавливаются метчики и с винтовыми канавками, имеющими угол наклона к оси метчика $\omega = 10...45^\circ$ (рис. 9.19, *в*, *г*). Для нарезания резьбы в сквозных и глухих отверстиях такие канавки имеют соответственно правое и левое направления. При этом

стружка выталкивается канавкой вперед при нарезании резьбы в сквозных отверстиях или назад к хвостовику – в глухих отверстиях.

Для сквозных отверстий используется также более простой способ направления стружки путем подточки пера по передней поверхности под углом λ (рис. 9.19, д). При этом также увеличивается объем канавки на режущих зубах заборной части и предотвращается ее защемление в отверстии.

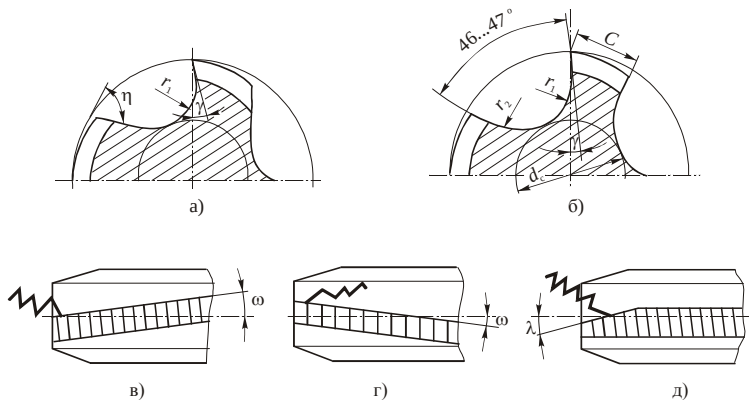


Рис. 9.19. Форма и направление стружечных канавок метчика: *а* – прямолинейный профиль; *б* – полукруглый профиль; *в* – винтовая канавка для нарезания резьбы в сквозных отверстиях; *г* – винтовая канавка для нарезания резьбы в глухих отверстиях; *д* – подточка передней поверхности метчика под углом λ

Глубина стружечных канавок обычно постоянна по всей длине рабочей части метчика или может несколько уменьшаться по направлению к хвостовику с целью повышения прочности. Она определяется диаметром метчика d и числом канавок z_k . Ориентировочно высота канавки $h_k = (0,35 \dots 0,4)d$ при $z_k = 3$; $h_k = (0,4 \dots 0,45)d$ при $z_k = 4$; $h_k = (0,5 \dots 0,55)d$ при $z_k = 6$.

Прочность метчика зависит от диаметра сердцевины d_c и ширины пера C (рис. 9.19, б). От последнего параметра также зависит запас на переточку по передней грани. В то же время с увеличением ширины пера увеличивается момент трения на метчике. Ориентировочно значение ширины пера принимается равным $C = 0,3d$ при $z_k = 3$; $C = 0,2d$ при $z_k = 4$; $C = 0,16d$ при $z_k = 6$.

Рабочую часть ручных метчиков изготавливают из инструментальных сталей, машинно-ручные и машинные – из быстрорежущих сталей,

а также из твердых сплавов группы ВК, имеющих повышенную прочность. Рабочую часть метчиков диаметром $d > 8$ мм сваривают с хвостовиком из конструкционной стали.

Твердосплавные метчики диаметром до 8 мм делают цельными, диаметром 8...12 мм – с цельной рабочей частью и стальным хвостовиком (рис. 9.20, а), а диаметром более 12 мм – с напайкой твердосплавных пластин на корпуса инструментов, изготавливаемых из сталей 9ХС и ХВСГ (рис. 9.20, б).

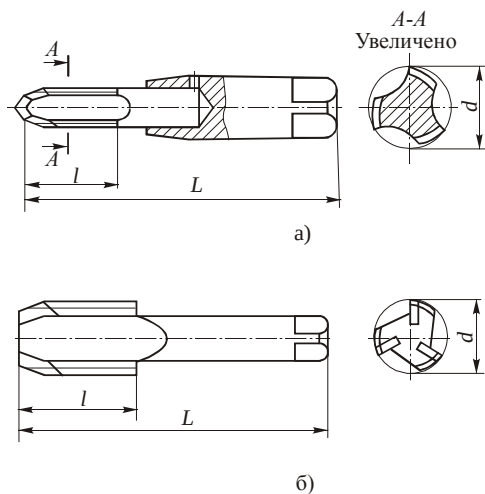


Рис. 9.20. Твердосплавные метчики: а – с цельной твердосплавной рабочей частью, припаянной к хвостовику; б – с напайными твердосплавными пластинами

Хвостовики метчика изготавливают цилиндрическими с квадратом на конце для зажима и передачи крутящего момента. Диаметр хвостовика обычно меньше внутреннего диаметра резьбы на 0,25...1,0 мм. У метчиков для резьб $d = 2...10$ мм, чтобы повысить прочность, делают усиленные хвостовики диаметром, большим диаметра рабочей части. Длина хвостовика зависит от глубины нарезаемого отверстия. У гаечных метчиков она наибольшая, что необходимо для размещения гаек. При этом хвостовик может быть изогнутой формы (см. ниже).

Допуски на размеры профиля метчиков. Допуски на элементы резьбы d , d_1 , d_2 , P и $\alpha/2$ назначаются в соответствии с ГОСТ 3266–81.

Их величина зависит от степени точности нарезаемой резьбы и класса точности метчика (табл. 9.4).

Таблица 9.4

**Влияние класса точности метчика на степень точности
нарезаемой резьбы**

Степень точности нарезаемой резьбы	4H, 5H, 4H5H	5H6H, 6H	6H	6H, 7H	6G	6G, 7G
Класс точности метчика	1	2	3	4	1	2

Примечания: 1. При двойном обозначении степени точности резьбы, например 4H5H, на первом месте ставится степень точности по d_2 гайки, на втором – болта. 2. Метчики классов 1, 2, 3 изготавливаются со шлифованной резьбой.

На рис. 9.21, *a* показано расположение полей допусков на диаметры резьб гайки и метчика для метрической крепежной резьбы.

При посадке с зазором поле допуска резьбы гайки находится выше номинального профиля (в «теле» гайки). Поле допуска на резьбу метчика лежит внутри поля допуска на гайку, оно значительно уже и расположено ближе к номинальному профилю, но не совпадает с ним, а имеет допуск на износ по наружному d и среднему d_2 диаметрам (рис. 9.21, *б*). Верхняя граница поля допуска гайки по наружному диаметру не ограничивается, поэтому поле допуска метчика по этому параметру находится полностью в поле допуска гайки, в том числе с допуском на износ.

Средний диаметр резьбы d_2 является основным параметром, характеризующим класс точности метчика. Поле допуска на него состоит из допусков на износ, изготовление и разбивку, которые в сумме равны допуску на средний диаметр гайки D_2 .

Внутренним диаметром d_1 метчик не должен снимать стружку. Поэтому верхнее отклонение поля допуска метчика на d_1 должно быть ниже наименьшего диаметра резьбы гайки. Нижнее отклонение по d_1 метчика не регламентируется. Дно впадины резьбы метчика может быть произвольной формы, в том числе с закруглением, но не должно заходить за нижнюю границу поля допуска на диаметр D_1 гайки, т.е. метчик впадиной резьбы не должен касаться внутренней поверхности резьбы гайки.

Допуск на шаг резьбы метчика зависит от погрешностей механизма подачи резьбошлифовального станка и погрешностей, вызванных термообработкой. У метчиков 1, 2, 3-го классов точности в зависимости от диаметра и класса точности предельные отклонения по шагу на длине 25 витков составляют 0,006...0,012 мм.

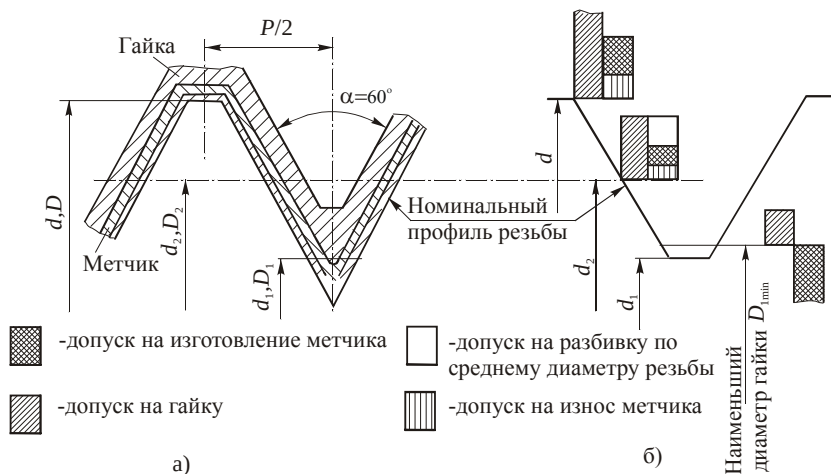


Рис. 9.21. Схемы расположения полей допусков на диаметры резьбы метчика (d , d_1 , d_2) и гайки

Отклонение по углу профиля α назначается с учетом обеспечения симметричности профиля. Поэтому оно задается на половину этого угла. С учетом возможных погрешностей инструментов, нарезающих резьбу метчика, после термообработки метчиков классов точности 1, 2, 3 этот допуск в зависимости от диаметра и класса точности равен

$$\delta(\alpha/2) = \pm 40 \dots 15'.$$

Выбор диаметра отверстия под резьбу зависит от вида материала, его способности к вспучиванию резьбы после прохода метчика. При обработке материалов повышенной вязкости, а также с большим упругим восстановлением (цветные металлы, титановые сплавы) наблюдается уменьшение внутреннего диаметра нарезанной резьбы, вызывающее увеличение момента трения и иногда поломку метчика.

Во избежание этого диаметр отверстия под метчик $d_{\text{св}}$ выбирают больше внутреннего и меньше наружного диаметра резьбы метчика, т.е. диаметр сверла $d_1 < d_{\text{св}} < d$. Ориентировочно при нарезании метрических резьб в стальных заготовках диаметр сверла можно определить по формуле

$$d_{\text{св}} = d - P.$$

Особенности конструкций некоторых основных типов метчиков. Несмотря на простоту конструкций метчиков, в практике нашли применение различные варианты их исполнения применительно к решению конкретных задач производства. Насчитывается более 12 вариантов исполнения машинных метчиков, часть из которых представлена на рис. 9.22, *а-и*. Ниже даны краткие характеристики конструкций метчиков, нашедших наибольшее практическое применение.

Слесарные (ручные) метчики предназначены для нарезания резьбы вручную. Они изготавливаются из инструментальных сталей комплектами из двух или трех метчиков, у которых резьба получена накаткой роликами. Класс точности метчика невысокий (4-й класс). В последнее время стали изготавливать слесарные метчики также из быстрорежущей стали со шлифованным профилем, в том числе с унифицированной резьбой по американским стандартам диаметром $d = 1/4 \dots 1''$. Для нарезания резьбы в сквозных отверстиях у ручных метчиков, так же как у машинных, делают подточку передней грани под углом λ (рис. 9.22, *а*).

Машинные и машинно-ручные метчики (см. рис. 9.13) используются на сверлильных, токарных и агрегатных станках для нарезания метрической резьбы М2...М24 в заготовках из стали прочностью σ_b до 800 Н/мм², латуни, чугуна, в сквозных и глухих отверстиях. Размеры таких метчиков стандартизованы. Материал режущей части метчиков – сталь Р6М5, резьба шлифованная и затылованная. Машинно-ручные метчики выпускаются комплектами из двух или трех номеров и могут использоваться также при нарезании резьбы вручную. Стандартные машинные метчики одинарные, имеют относительно короткую заборную часть и прямые стружечные канавки, передний угол $\gamma = 10^\circ$. Если они не отвечают требованиям производства, то могут быть переделаны на специальные метчики самим потребителем или по заказу инструментальными заводами. Переделка чаще всего состоит в изменении углов γ , ϕ , λ , а также в удалении части ниток в шахматном порядке. В этом случае исходят из того, что при обработке вязких материалов следует увеличить угол γ до 20° , а хрупких материалов (чугуна, бронзы), наоборот, уменьшить угол γ до $4 \dots 6^\circ$. С помощью угла ϕ можно регулировать толщину среза на один зуб a_z и, соответственно, силы резания и шероховатость поверхности с учетом изложенного выше.

Метчики с шахматным расположением зубьев (рис. 9.22, *б*) рекомендуется использовать для нарезания резьбы в вязких материалах, так как они исключают заклинивание витков инструмента в процессе резания вследствие уменьшения сил трения. При этом срезание зубьев метчика осуществляется обычно только на его калибрующей части. При

обработке малопрочных вязких материалов зубья срезаются как на $1/3$ длины заборной части, так и по всей ее длине. Практика показывает, что эффект уменьшения сил трения тем выше, чем больше шаг резьбы.

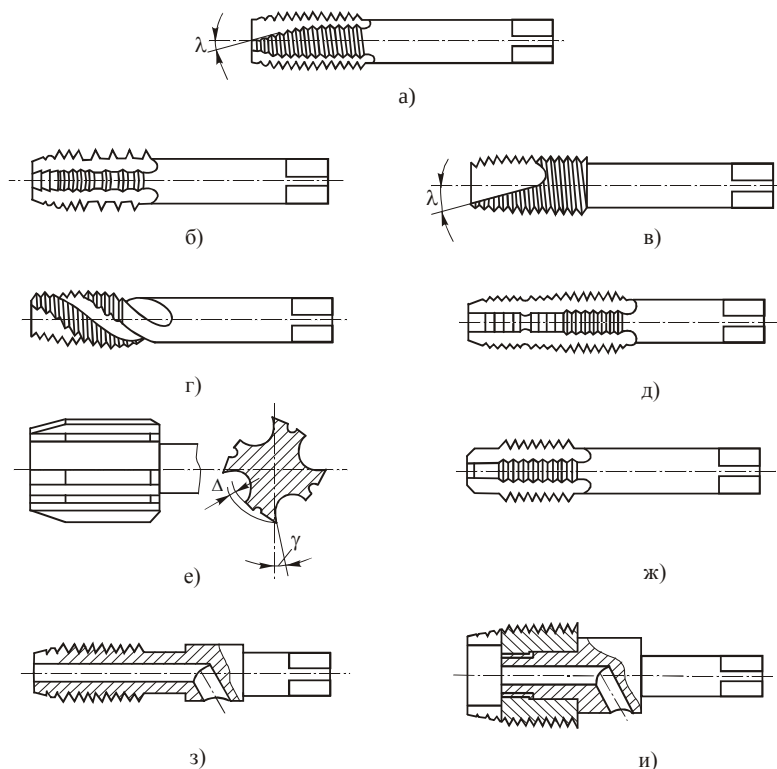


Рис. 9.22. Конструкции некоторых типов метчиков: *а* – слесарный (ручной); *б* – с шахматным расположением зубьев; *в* – бесканавочный; *г* – с винтовыми канавками; *д* – ступенчатый; *е* – с режуще-выглаживающими зубьями; *ж* – с направляющей частью; *з* – с внутренним подводом СОЖ; *и* – колокольного типа

Метчики с укороченной стружечной канавкой (рис. 9.22, *в*) или, как их часто называют, бесканавочные имеют короткие канавки переменной глубины с углом наклона дна канавки к оси $\psi = 5 \dots 10^\circ$ и осевым углом $\lambda = 9 \dots 12^\circ$. По сравнению с обычными метчиками эти метчики из-за большого поперечного сечения более прочные. Длина канавок примерно равна удвоенной длине заборного конуса. Во избежание по-

вышенного момента трения из-за отсутствия канавок на большей длине незатывающей калибрующей части делают большую обратную конусность по наружному диаметру (до 0,2 мм на 100 мм длины).

Такие метчики рекомендуется применять для нарезания резьб диаметром до 10 мм в сквозных отверстиях заготовок из труднообрабатываемых легированных сталей, вязких низкоуглеродистых сталей, цветных металлов и сплавов. Они обеспечивают также высокую точность и низкую шероховатость поверхности резьбы.

Метчики с винтовыми канавками (рис. 9.22, *з*), как было показано выше, рекомендуются для надежного удаления стружки в основном из глухих отверстий. При нарезании резьбы в сквозных отверстиях удаление стружки в направлении подачи метчика проще обеспечить путем подточки передней поверхности под осевым углом λ .

Ступенчатые метчики (рис. 9.22, *д*) имеют двойную режущую часть и позволяют реализовать в одном метчике любую комбинацию схем резания. Например, первая часть, имеющая занижение по профилю, может обрабатывать резьбу по генераторной схеме, а вторая – по профильной. При этом можно нарезать высокоточные резьбы. Эта конструкция удобна и для таких комбинированных схем, в которых одна часть выполняет резание, а вторая – выглаживание резьбы.

Метчики с режуще-выглаживающими зубьями (рис. 9.22, *е*) имеют перья с режущими и ведущими участками. Если перепад по диаметру $\Delta < 0$, то имеет место сочетание резания и выглаживания резьбы. При $\Delta > 0$ опорные ведущие участки перьев позволяют повысить точность нарезаемой резьбы. Небольшое занижение Δ существенно снижает вероятность разбивки резьбы, особенно в случае несовпадения осей метчика и отверстия. Канавки, разделяющие режущие и ведущие части метчика, служат для подвода СОЖ и выхода абразивного круга при шлифовании профиля резьбы.

Метчики с направляющими частями (рис. 9.22, *ж*) применяются для обработки деталей с точным взаимным расположением поверхностей нескольких отверстий. У метчиков для сквозных отверстий направляющая часть располагается впереди режущей части, а для глухих – после калибрующей части. Направляющая часть, расположенная после калибрующей части, имеет увеличенный диаметр и требует применения кондукторной втулки.

Метчики с внутренним подводом СОЖ (рис. 9.22, *з*) имеют стойкость в 3...4 раза выше из-за лучших условий охлаждения, смазки и отвода стружки, но требуют специальных устройств для подвода СОЖ.

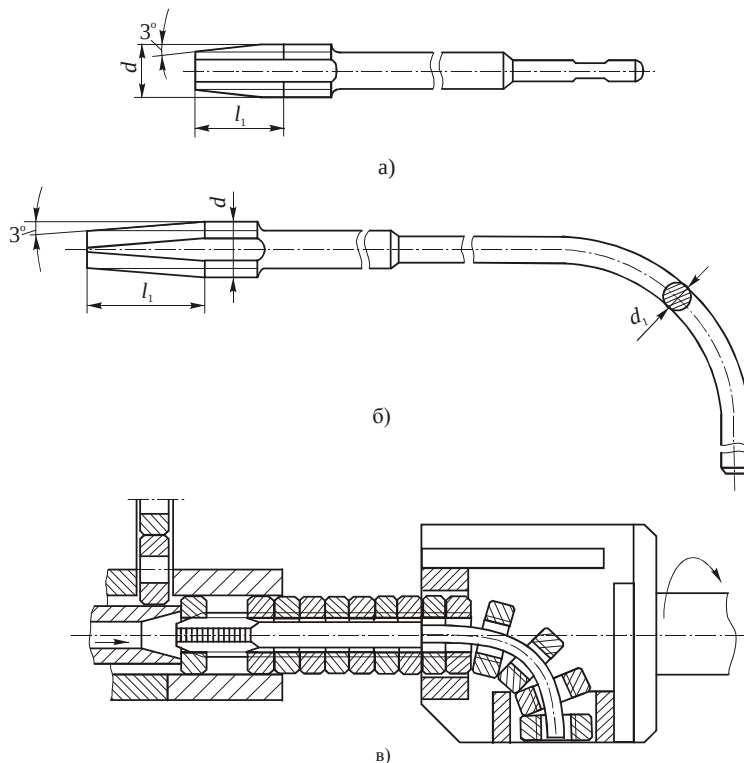


Рис. 9.23. Гаечные метчики: *а* – с прямым хвостовиком; *б* – с изогнутым хвостовиком; *в* – схема работы гайконарезного станка-автомата

Метчики колокольного типа (рис. 9.22, *и*) применяют при нарезании резьб в сквозных отверстиях крупных диаметров $d = 50 \dots 400$ мм в тяжелом машиностроении. Они выполняются цельными или составными. В последнем случае рабочая часть метчика насадная, состоящая из режущей и калибрующей частей. Внутренняя полость метчика обеспечивает подвод СОЖ и имеет большое пространство для размещения стружки. Число перьев у таких метчиков доходит до 16.

Гаечные метчики (рис. 9.23) служат для нарезания сквозных резьб без свинчивания гаек путем их нанизывания на хвостовую часть. Для лучшего захода метчика в отверстие они имеют длинную заборную и короткую калибрующую части. В начале заборной части снимают фаску

под углом 45° на длине $(1 \dots 1,5)P$, а иногда делают гладкую переднюю направляющую диаметром $d_n = d_{\min} - (0,1 \dots 0,3)$ мм.

Из-за большой длины гаечных метчиков, затрудняющей их изготовление, особенно при шлифовании резьбы, их часто делают составными: отдельно изготавливают режущую и хвостовую части, а затем их соединяют сваркой трением, пайкой или с помощью резьбы.

Хвостовики гаечных метчиков изготавливают длинными прямыми или изогнутой формы (рис. 9.23, а, б). Метчики с изогнутыми хвостовиками применяют для нарезания резьбы в гайках на станках-автоматах с непрерывным циклом. Здесь заготовки гаек подаются из бункера в зону резания и после нарезания резьбы сходят по изогнутому хвостовику в лоток (рис. 9.23, в).

Плашечные и маточные метчики (рис. 9.24). Плашечные метчики служат для предварительного нарезания резьбы в круглых плашках до сверления стружечных отверстий, а маточные – для калибрования резьбы после сверления. Иногда их объединяют в один комбинированный плашечно-маточный метчик и используют для нарезания резьбы в плашках за один проход.

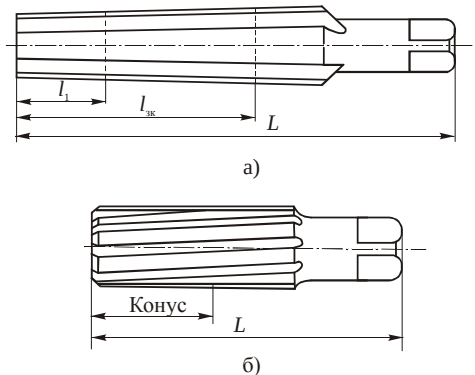


Рис. 9.24. Метчики: а – плашечный; б – маточный

Так как обрабатываемый материал часто имеет большую твердость, а к резке предъявляются высокие требования по точности, то для лучшего направления метчика в отверстии угол заборного конуса у плашечных метчиков берут малым $\varphi = 1^\circ 20'$, а длину заборного конуса

большой – $\ell_{\text{зк}} = (46 \dots 48)P$. При этом на длине заборной части, равной $\ell_1 = 16P$, зубья имеют полный профиль с углом $\varphi = 1^\circ 20'$ и затылованием на величину $k_z = 0,03 \dots 0,06$ мм по d_2 и d_1 , на остальной части, выполненной по цилиндру с затылованием по вершинам зубьев, – на величину $k_z = 0,45 \dots 1,1$ мм. Таким образом, плащечный метчик имеет только режущие зубья, которые на первом участке работают по профильной схеме резания, а на втором – по генераторной. Число перьев метчика принимается на 1...2 больше числа отверстий в плашке.

У маточных метчиков имеются заборная часть длиной $\ell_1 = 12P$ с углом $\varphi = 0^\circ 12'$ и калибрующая часть длиной $\ell_2 = 10P$. Во избежание ударов стружечные канавки делают винтовыми с углом $\omega = 8 \dots 10^\circ$ и направлением, противоположным направлению резьбы. Число канавок маточного метчика $z_k = 6 \dots 10$, а у метчиков $d < 6$ мм делается одна канавка.

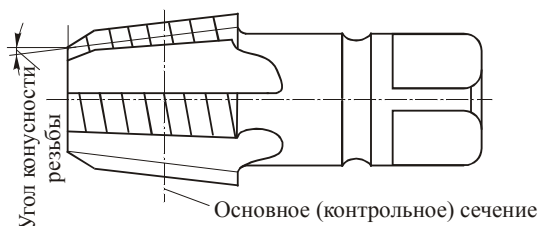


Рис. 9.25. Метчик для конической резьбы

Метчики для конической резьбы (рис. 9.25) применяют там, где требуется получить герметичное резьбовое соединение без применения уплотнительных средств. Это достигается за счет деформации

витков резьбы при осевом перемещении, например труб, муфт, работающих при высоких давлениях передаваемой среды (масло, вода, воздух) и высоких температурах.

Особенность работы конических метчиков заключается в том, что нарезание резьбы происходит по всей длине метчика, равной длине резьбы. Калибрующая часть у конических метчиков отсутствует, что способствует появлению больших усилий резания. Нарезание резьбы, как правило, производится на станках с предохранительным устройством, срабатывающим в конце резания. Основные параметры метчиков подобны параметрам метчиков для цилиндрических резьб. Режущие зубья затылуются по наружному диаметру ($\alpha_b = 6 \dots 8^\circ$, $\gamma = 5 \dots 10^\circ$).

Метчики сборные, регулируемые (рис. 9.26) применяются с целью экономии инструментальных материалов при нарезании резьб больших диаметров, чтобы компенсировать износ, они часто изготавливаются сборными, регулируемыми по диаметру.

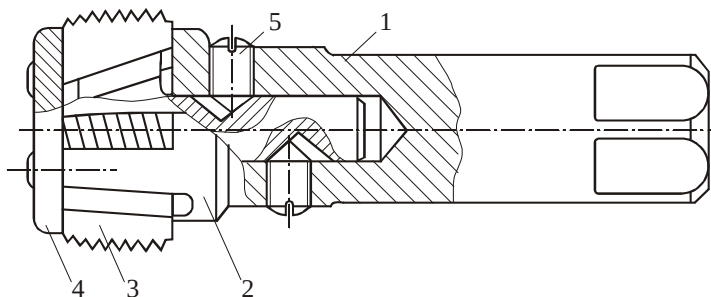


Рис. 9.26. Регулируемый метчик

Как видно из рис. 9.26, в корпусе 1 крепится стержень 2 с наклонными пазами. Гребенки 3 входят в пазы стержня и прижимаются крышкой 4. При перемещении стержня 2 с помощью винтов 5 происходит регулировка диаметра метчика. На заборной части метчика угол $\varphi = 10 \dots 15^\circ$ – для сквозных отверстий и $\varphi = 20 \dots 30^\circ$ для глухих отверстий. Передний угол $\gamma = 5 \dots 25^\circ$, а задний угол на режущей части ($\alpha = 8 \dots 10^\circ$) получают затылованием. Резьба на гребенках винтовая, совпадающая по направлению с нарезаемой.

Недостатком этой конструкции является необходимость вывинчивания метчика из отверстия. Есть более сложные конструкции сборных метчиков, у которых вывинчивание исключается за счет утопления гребенок в конце нарезания резьбы.

Метчик-протяжка (рис. 9.27) позволяет нарезать в сквозных отверстиях резьбу любых профилей и длины, с любым числом заходов. Метчик-протяжка по сравнению с обычными метчиками и резьбовыми резцами обеспечивает повышение производительности в несколько раз при высокой точности и низкой шероховатости резьбы.

Особенности конструкции метчика-протяжки: 1) хвостовик располагается впереди режущей части и метчик работает на растяжение; 2) рабочая часть метчика представляет собой коническую поверхность большой протяженности с зубьями, профиль которых соответствует профилю нарезаемой резьбы. Угол заборного конуса очень мал –

$\varphi \cong 1^\circ 40'$; 3) зубья по среднему диаметру не затылуются, а затачиваются только по задним поверхностям с двойной заточкой: $\alpha_1 = 12 \dots 15^\circ$, $\alpha_2 = 30 \dots 60^\circ$; 4) из-за угла φ ширина режущих кромок по наружному диаметру переменная. Она уменьшается от первых зубьев к последним, т.е. используется генераторная схема резания; 5) стружечные канавки выполняют винтовыми: для правой резьбы – левые, для левой резьбы – правые, с углом наклона к оси метчика $\omega = 4 \dots 15^\circ$, угол раскрытия канавки $\psi = 80 \dots 90^\circ$; 6) в конце рабочей части метчика иногда предусматривают короткую калибрующую часть и задний хвостовик; 7) число канавок $z_k = 3$ для $d \leq 20$ мм и $z_k = 4$ для $d > 20$ мм.

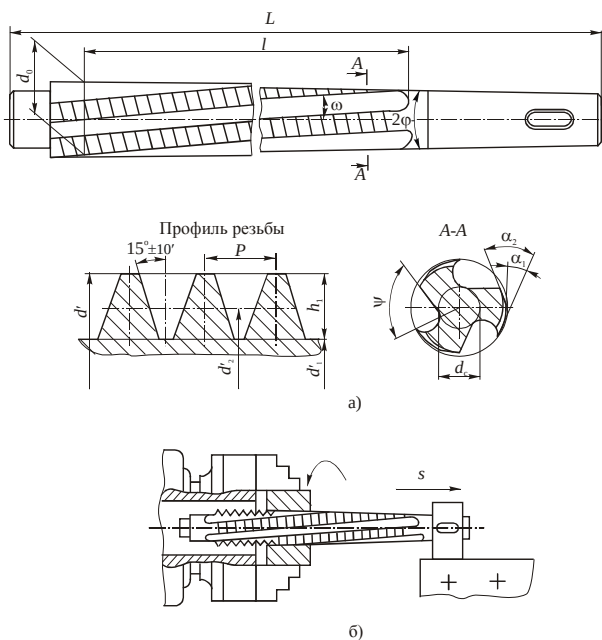


Рис. 9.27. Метчик-протяжка: а – конструкция; б – схема протягивания внутренней резьбы

Нарезание резьбы обычно производится на токарном станке с $n = 18 \dots 40$ об/мин и $V = 2 \dots 3$ м/мин. Хвостовик метчика с помощью клина крепят на суппорте станка. Перед протягиванием заготовку надевают на метчик и зажимают в самоцентрирующем патроне станка (рис. 9.27, б) и приводят во вращение. При этом шпиндель станка включают на обрат-

ный ход и суппорт перемещается вправо с подачей на один оборот, равной шагу нарезаемой резьбы.

При нарезании резьбы в высокопрочных материалах рабочую часть метчика-протяжки делят на ступени. При этом каждая ступень имеет режущую и калибрующую части, а проточки между ступенями служат для выхода стружки.

9.4. Резьбонарезные плашки

Резьбонарезная плашка – это гайка, превращенная в режущий инструмент путем сверления стружечных отверстий и формирования на зубьях режущих перьев передних и задних углов.

Плашки применяют для нарезания наружных резьб на болтах, винтах, шпильках и других крепежных деталях. По форме наружной поверхности плашки бывают: круглые, квадратные, шестигранные, трубные. Для слесарных работ они делаются разрезными и зажимаются в воротках.

Самое широкое применение нашли плашки круглые, как наиболее технологичные и простые в эксплуатации. Они изготавливаются из калиброванных прутков быстрорежущей стали на токарных прутковых станках-автоматах.

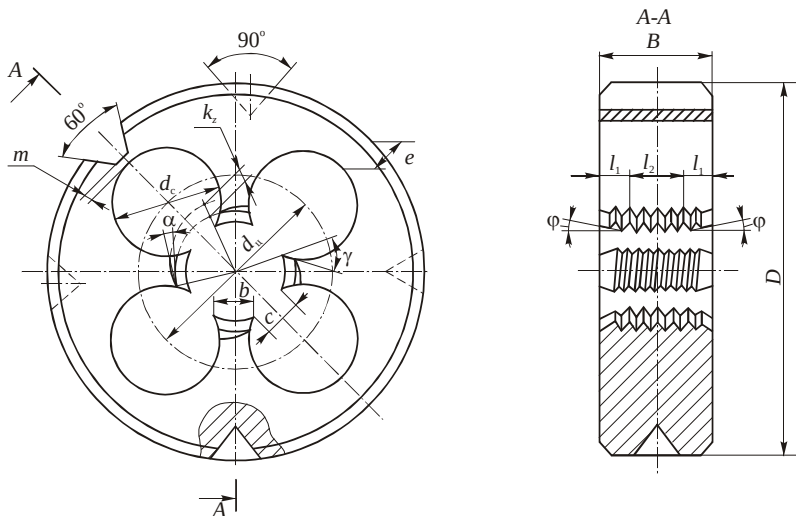


Рис. 9.28. Конструктивные элементы круглой плашки

На рис. 9.28 показана конструкция круглой плашки и ее основные конструктивные и геометрические параметры. К ним относятся: наружный диаметр плашки D , толщина B , диаметры стружечных отверстий d_c и окружности их центров $d_{ц}$, ширина просвета c , ширина пера b , минимальная толщина стенки e . Геометрические параметры плашки: передний угол γ , задний угол α и угол заборного конуса φ . На наружной поверхности плашки имеются 3 или 4 конических углубления с углом при вершине 90° для крепления в воротке или кольце. На этой же поверхности плашек выполнен трапецевидный паз с углом 60° , образующий переемычку толщиной $m = 0,4 \dots 1,5$ мм, которую после двух-трех переточек плашки разрезают.

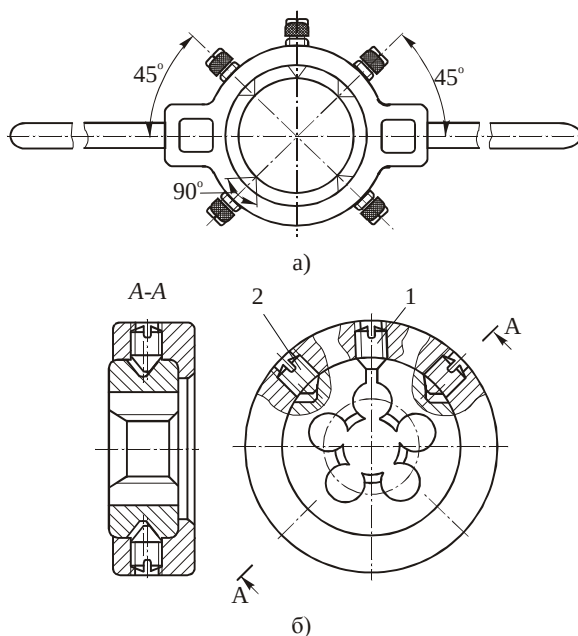


Рис. 9.29. Устройства для крепления плашек:
а – вороток; б – кольцо

Плашки устанавливаются в воротке при работе вручную или в кольце при работе на станках (рис. 9.29, а, б) с подвижной посадкой по наружному диаметру. Во избежание перекоса плашки оси крепежных винтов смещены относительно осей конических углублений так, чтобы

надежно прижимать торец плашки к торцу посадочного гнезда. Винтом 1, входящим в паз после разрезания перемычки, и крепежными винтами 2, входящими в углубления, можно регулировать диаметры резьбы плашки после износа.

В основном плашками нарезают остроугольную крепежную резьбу диаметром от 2 до 36 мм, реже от 42 до 48 мм. Для калибровки резьб, нарезанных другими инструментами (резцами, фрезами), применяют плашки с резьбовым диаметром $d = 56 \dots 135$ мм и выше.

Наружный диаметр плашки

$$D = d_{\text{ц}} + d_{\text{с}} + 2e. \quad (9.3)$$

Диаметры $d_{\text{с}}$ и $d_{\text{ц}}$ рассчитываются исходя из условий свободного размещения стружки и минимальной толщины стенки e , которая задается. По данным [22], для плашек диаметром $D = 2 \dots 52$ мм рекомендуется принимать

$$e = (0,6 \dots 0,9) \sqrt{D}.$$

С целью сокращения номенклатуры диаметров прутков, из которых плашки изготавливаются, и воротков (колец) для их крепления габаритные размеры плашек (D и B) нормализованы в виде рядов предпочтительных размеров.

Рабочая часть плашки состоит из двух взаимозаменяемых при износе заборных конусов с углом 2φ , расположенных с обоих торцов, и калибрующей части между ними (рис. 9.28).

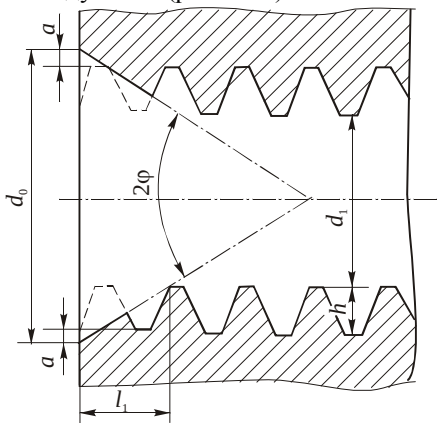


Рис. 9.30. Режущая часть плашки

Длина режущей части (рис. 9.30) вычисляется по формуле

$$\ell_1 = \frac{h + a}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{d_0 - d_1 + 2a}{2 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (9.4)$$

где d_0 – диаметр входного отверстия плашки; d_1 – внутренний диаметр резьбы; a – фаска, снимаемая с торца для лучшего захода заготовки в отверстие плашки ($a = 0,2 \dots 0,4$ мм); h – высота профиля резьбы.

Число режущих зубьев плашки на одном заборном конусе равно

$$z = z_c \frac{\ell_1}{P},$$

где z_c – число стружечных отверстий (перьев); P – шаг резьбы.

По аналогии с метчиками толщина среза на одном зубе плашки

$$a_z = \frac{h}{z} = \frac{\ell_1 P}{\operatorname{tg} \varphi z_c \ell_1} = \frac{P}{z_c} \operatorname{tg} \varphi. \quad (9.5)$$

Угол заборного конуса рекомендуется брать следующим: при нарезании резьбы в заготовках из высокопрочных материалов $2\varphi = 20 \dots 30^\circ$, легких цветных металлов и сплавов – $2\varphi = 50 \dots 70^\circ$. У стандартных плашек общего применения угол $2\varphi = 50^\circ$.

Число стружечных отверстий рекомендуется принимать в зависимости от диапазона наружных диаметров нарезаемой резьбы d (табл. 9.5).

Таблица 9.5

Количество стружечных отверстий в плашках

d , мм	2...5	6...18	20...30	33...48
z_c	3	4	5	6

Длина режущей части из-за необходимости сокращения длины сбега резьбы на заготовках невелика и равна $\ell_1 = (1,5 \dots 3,0)P$. При этом у стандартных плашек толщина среза на один зуб в зависимости от шага и диаметра резьбы $a_z = 0,063 \dots 0,375$ мм/зуб. В сравнении с метчиками это означает, что зубья плашки снимают стружки значительно большей толщины и, следовательно, работают с большими усилиями резания.

Калибрующая часть плашки предназначена для калибрования резьбы. Она влияет на направление и самоподачу инструмента в процессе резания. Шлифовать резьбу на ней и тем более проводить затылование невозможно. Поэтому задние углы на зубьях равны нулю. Точность нарезаемой резьбы из-за погрешностей, вызванных термообработкой, невысока – не более $6h$, $8h$.

Чтобы уменьшить трение на калибрующей части плашки и величину искажений профиля резьбы, ее длину берут минимально возможной – обычно $\ell_2 = (3 \dots 6)P$.

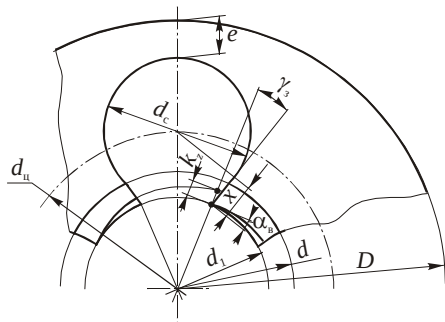


Рис. 9.31. Геометрические параметры плашки с прямолинейным участком передней поверхности пера

Геометрические параметры плашки.

Передний угол γ измеряется между радиусом, проведенным в точку режущей кромки зуба (через него проходит основная плоскость), и касательной к передней поверхности (рис. 9.31). Так как последняя является частью поверхности стружечного отверстия, то передний угол получается очень большим. Его можно уменьшить путем срезания по передней

поверхности зенкером (до термообработки) или путем подточки шлифовальными кругами малых диаметров (после термообработки) на специальных станках при удалении части перемычки, остающейся после сверления стружечных отверстий (рис. 9.31, а). При этом прямолинейный участок передней поверхности делается несколько больше, чем высота профиля резьбы, т.е. $x > h$. Угол заточки $\gamma_3 < \gamma$ выбирается в зависимости от обрабатываемого материала: для твердых материалов $\gamma_3 = 10 \dots 15^\circ$, для легкообрабатываемых $\gamma_3 = 20 \dots 25^\circ$, у стандартных плашек $\gamma_3 = 15 \dots 20^\circ$.

При обработке вязких материалов с целью увеличения стружечного отверстия и направления стружки в сторону подачи аналогично метчикам иногда после термообработки абразивными головками делают подточку по передней поверхности режущих зубьев под углом к оси плашки $\lambda = 15^\circ$ (рис. 9.32, а). Задний угол α_b на вершинных кромках зубьев заборного конуса получают методом затылования по архимедовой спирали. У стандартных плашек $\alpha_b = 6 \dots 9^\circ$. Обычно применяют осевое затылование, поэтому в плоскости, перпендикулярной к оси плашки, величина падения затылка

$$k_z = \frac{\pi d_1}{z_c} \operatorname{tg} \alpha_b,$$

а вдоль оси

$$k_{z_{oc}} = k_z \operatorname{tg} \varphi.$$

Причем k_z отсчитывается на радиусе, проведенном в вершину соседнего пера.

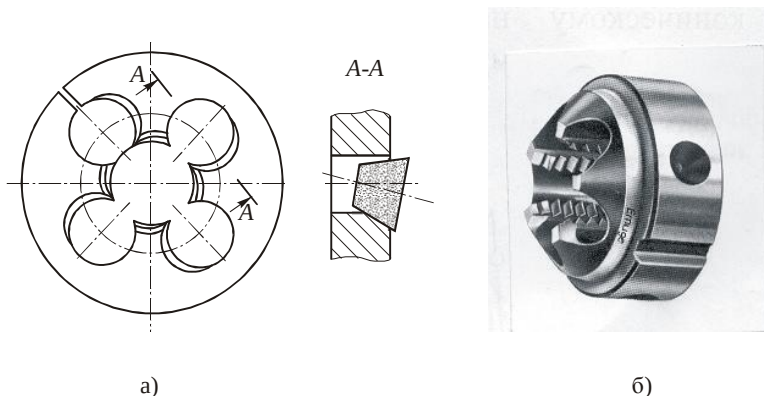


Рис. 9.32. Способы улучшения конструкции плашек: а – подточка режущей части по передней поверхности; б – вынос режущей части на торец плашки

Одним из способов улучшения конструкции плашек является вынос режущей части на торец и оформление ее в виде конуса с прорезанными стружечными пазами (рис. 9.32, б). Преимущества такой конструкции состоят в следующем: отпадает необходимость в сверлении стружечных отверстий, создается возможность простой заточки и переточки под различными углами γ и λ на универсально-заточном станке, уменьшается трудоемкость изготовления и создаются лучшие условия для отвода стружки. Такие плашки выпускаются некоторыми зарубежными фирмами.

Расчет плашек заключается в определении диаметров стружечных отверстий $d_c = 2r_c$, диаметра окружности их центров $d_{ц} = 2r_{ц}$ и наружного диаметра D плашки при заданном внутреннем диаметре нарезаемой резьбы $d_1 = 2r_1$. Расчетная схема представлена на рис. 9.33.

При расчете плашки большое значение имеет правильный выбор соотношения ширины пера и просвета b/c . Ширина пера b должна быть достаточной для обеспечения прочности и жесткости. Именно по причине поломки перьев плашки часто выходят из строя. В то же время с увеличением ширины перьев возрастает

крутящий момент трения, сокращается ширина просвета, ухудшаются условия отвода стружки. При этом возможны пакетирование и защемление стружки, а также поломка перьев. Поэтому рекомендуют [22] брать отношение $b/c = 0,65 \dots 0,85$. При расчете также задаются значениями таких параметров, как внутренний диаметр (радиус) резьбы d_1 (r_1), наружный диаметр плашки (предварительно) D , число перьев $n = z_c$ (табл. 9.5), угол заточки γ_3 , величина подточки по передней поверхности $x = (1,2 \dots 1,5)h$.

Для облегчения сверления стружечных отверстий и оформления передней поверхности при подточке предусматривается величина перекрытия окружностей с радиусами r_1 и r_c в пределах $f = (0,1 \dots 0,2) r_c$.

На расчетной схеме (рис. 9.33) показана передняя поверхность плашки до заточки как часть стружечного отверстия с передним углом γ и прямолинейным участком x после заточки угла γ_3 . При этом углы между линией центров OO_c и радиусами, проведенными в точки A и B , обозначены соответственно ω и ω_3 :

Радиус стружечного отверстия найдем из соотношения $c/2 = r_1 \sin \omega = r_c \cos(\omega + \gamma)$

$$r_c = \frac{r_1 \sin \omega}{\cos(\omega + \gamma)}. \quad (9.6)$$

Радиус окружности центров стружечных отверстий (рис. 9.33) вычислим по формуле

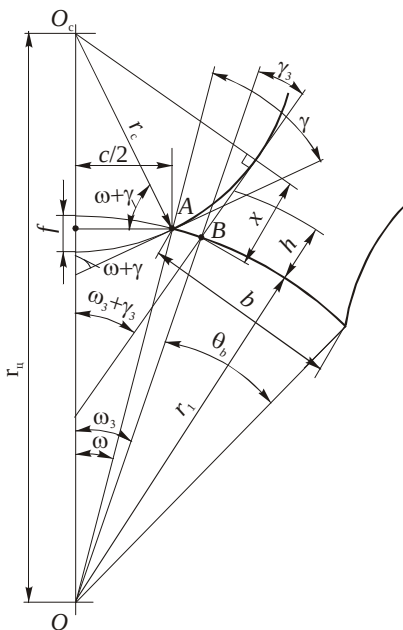


Рис. 9.33. Расчетная схема определения основных конструктивных параметров плашки

$$r_c = r_1 \cos \omega + r_c \sin(\omega + \gamma).$$

После подстановки r_c из уравнения (9.6) получим

$$r_{\text{ц}} = r_1 [\cos \omega + \sin \omega \operatorname{tg}(\omega + \gamma)]. \quad (9.7)$$

Найдем угол ω с учетом отношения $b/c = \sin \theta_b / \sin 2\omega \approx \theta_b / 2\omega$. Так как $2\omega + \theta_b = 2\pi/n$, то после подстановки и некоторых преобразований найдем, что

$$\omega = \pi/n(1 + b/c). \quad (9.8)$$

Передний угол в уравнениях (9.6) и (9.7) предварительно назначается в пределах $\gamma = \gamma_3 + (10 \dots 15)^\circ$.

В конце расчета производится проверка на допустимую толщину стенки плашки

$$e = 0,5(D - d_{\text{ц}} - d_c)$$

и величину перекрытия окружностей радиусов r_1 и r_c

$$f = 0,5(d_1 - d_{\text{ц}} + r_c).$$

Если полученные значения e и f не удовлетворяют указанным выше ограничениям, то, задаваясь их новыми значениями и отношением b/c в пределах допустимых диапазонов, по уравнениям (9.6) и (9.7) находят новые значения r_c и $r_{\text{ц}}$ с возможной корректировкой диаметра плашки D , числа стружечных отверстий z_c и угла заточки γ_3 .

Окончательно эти и другие параметры плашки уточняют прочерчиванием ее в большом масштабе.

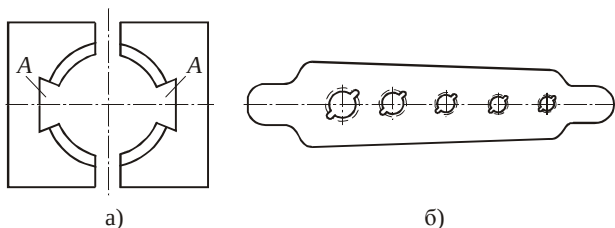


Рис. 9.34. Плашки: а – слесарная; б – слесарная винторезная дощечка

Измерение элементов резьбы плашки представляет большие затруднения. Проверка качества плашек осуществляется обычно косвенным

путем: нарезанием резьбы на пробной заготовке и измерением ее параметров. Поэтому допуски на элементы резьбы плашек не устанавливаются, задаваясь ими только для плашечных и маточных метчиков, применяемых при изготовлении плашек.

Конструктивные особенности плашек других типов. При нарезании резьбы вручную применяются *плашки слесарные* (рис. 9.34, а). Они делаются квадратными разрезными для того, чтобы в процессе резания можно было регулировать диаметр в зависимости от нагрузки и производить нарезание резьбы в несколько проходов. Плашки имеют две стружечные канавки *A* и устанавливаются в специальных воротках – клуппах, снабженных винтами для крепления и регулировки зазора между двумя половинками плашки.

К слесарным плашкам также можно отнести и винторезную дощечку (рис. 9.34, б), в которой находится несколько плашек с небольшим диаметром резьбы и двумя стружечными отверстиями.

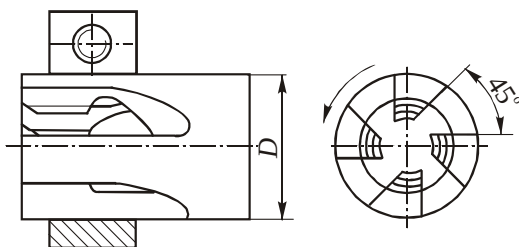


Рис. 9.35. Трубчатая плашка

Плашки трубчатые (прогонки) (рис. 9.35) представляют собой трубу из инструментальной стали с нарезанной резьбой. Для размещения сходящей стружки со стороны переднего торца в плашке прорезаны пазы, длина которых в 2 раза

больше длины нарезаемой резьбы. Стружка снимается зубьями, расположенными на заборном конусе, с углом $2\varphi = 50...60^\circ$. Длина резьбы плашки $\ell = (7...8)P$ и на заборной части $\ell_1 = (2,0...2,5)P$. Передний угол обеспечивается путем простой в исполнении заточки по передней грани в зависимости от свойств обрабатываемого материала и берется в диапазоне $\gamma = 0...25^\circ$, задний угол α создается затылованием по вершинным режущим кромкам, как у круглых плашек. Регулирование резьбы по диаметру производится с помощью разрезного кольца, надеваемого на плашку и сжимающего ее. Применяют такие плашки на revolverных станках и станках-автоматах. По сравнению с круглыми плашками они имеют следующие преимущества: 1) лучшие условия отвода стружки; 2) меньшее коробление при термообработке; 3) высокая технологичность из-за простой переточки по передней грани; 4) возможность регулирования диаметра резьбы при износе.

Недостатком трубчатых плашек является низкая точность нарезаемой резьбы.

Плашки для конических резьб (рис. 9.36) применяются при нарезании наружных резьб в трубопроводах высокого давления. Особенности конструкций таких плашек: 1) плашки работают не напроход, а только с одной стороны, имеющей заборный конус с углом $2\varphi = 30...55^\circ$; 2) перья делают как можно меньшей ширины для снижения сил резания и трения; 3) число стружечных отверстий равно $z_c = 4...7$, для $d=1/6...2''$; 4) углы режущих зубьев $\gamma = 20^\circ$, $\alpha = 6^\circ$.

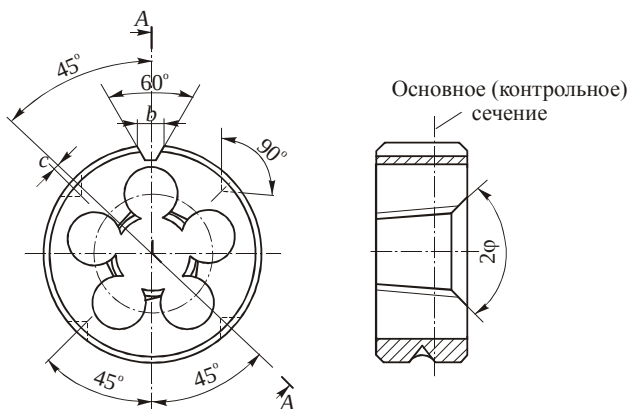


Рис. 9.36. Круглая плашка для конической резьбы

Наибольшая нагрузка на плашку возникает в конце нарезания резьбы. Во избежание поломок таких плашек необходимо применять патроны с предохранительным устройством от перегрузки.

9.5. Резьбонарезные головки

Они имеют достаточно широкое применение при нарезании чаще наружных и реже внутренних резьб на винтах, болтах, трубах и других деталях. Эти головки представляют собой достаточно сложные сборные конструкции с режущими элементами в виде круглых гребенок или плоских плашек, устанавливаемых в корпусе головки (рис. 9.37).

Резьбонарезные головки делятся на две основные группы: самооткрывающиеся и регулируемые. У первых производится отвод гребенок от заготовки в конце операции нарезания резьбы и тем самым отпадает необходимость в обратном свинчивании, а следовательно,

сокращается вспомогательное время и резко возрастает производительность. Поэтому эти головки получили большее распространение, чем регулируемые, хотя последние проще по конструкции.

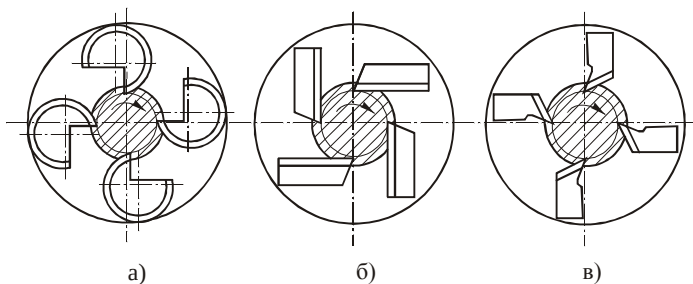


Рис. 9.37. Типы резьбонарезных головок: *а* – с круглыми гребенками; *б* – с тангенциальными плашками; *в* – с радиальными плашками

Резьбонарезные головки бывают вращающимися (модели 1КА...5КА), применяемыми на токарных автоматических и полуавтоматических станках, а также невращающимися, применяемыми на токарных и revolverных станках. Раскрытие головки осуществляется при помощи упоров на станке и вилки, устанавливаемой в кольцевой проточке вращающейся головки или с помощью рукоятки у невращающихся головок (рис. 9.38, *а*, *б*). В первом случае обычно заготовка не вращается, но может и вращаться. При этом раскрытие и закрытие головки происходит автоматически. Во втором случае вращается только заготовка и подача головки происходит самозатягиванием или принудительно.

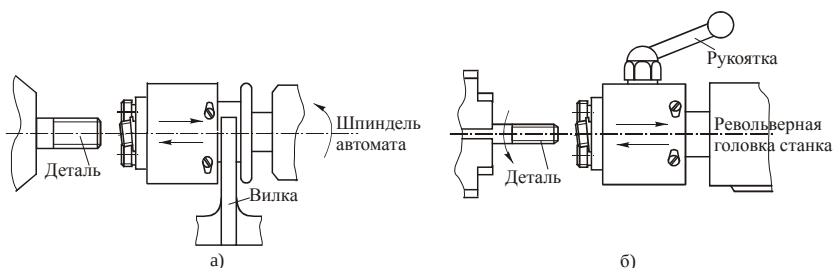


Рис. 9.38. Конструкции резьбонарезных самооткрывающихся головок: *а* – вращающаяся головка; *б* – невращающаяся головка

У невращающихся головок (модели 1К...5К) раскрытие головки производится автоматически в конце хода, а закрытие – вручную, с помощью рукоятки.

Из гребенок, применяемых в головках, наибольшее распространение получили круглые гребенки, которые более технологичны, имеют точную шлифованную резьбу и допускают большое количество переточек.

Головки с тангенциальными плашками (рис. 9.37, б) хотя и допускают большое количество переточек, но из-за меньшей технологичности вытесняются головками с круглыми гребенками. Еще реже применяются головки с призматическими радиальными плашками (рис. 9.37, в, имеющие минимальный запас на переточку, хотя конструкции головок с такими плашками более компактны.

Так как резбонарезные головки представляют собой достаточно сложную конструкцию, то ниже, на примере круглых гребенок, рассмотрим только режущий элемент головки, его геометрические параметры и установку относительно заготовки.

Круглые гребенки (рис. 9.39) подобны приведенным выше многогранным круглым фасонным резцам с кольцевыми резьбовыми витками. Они имеют большой передний угол $\gamma_3 = 10...25^\circ$ и угол заборного конуса $\varphi = 20^\circ$. Передняя поверхность гребенки затачивается под осевым углом λ .

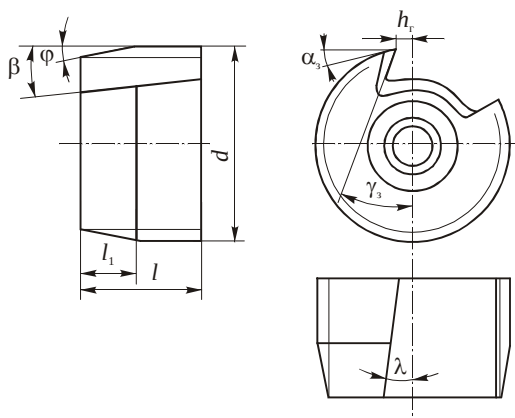


Рис. 9.39. Конструкция и геометрические параметры круглой гребенки

При установке комплекта гребенок в резбонарезной головке необходимо, чтобы витки каждой из гребенок совпадали с впадинами нарезаемой резьбы. Поэтому они должны иметь смещение вдоль оси, равное шагу, деленному на число гребенок.

Так как витки у гребенок кольцевые, то оси гребенок должны быть наклонены к оси заготовки под углом τ подъема нарезаемой резьбы, где

$$\tau = P / \pi d .$$

Задний угол заточки

$$\sin \alpha_3 = h_r / r .$$

На практике это требование выполняется за счет того, что гребенки крепятся на кулачках, управляющих самооткрыванием головки в конце хода, торец которых наклонен под углом τ (рис. 9.40, б). При этом фактический осевой угол на режущей части $\lambda_1 = \tau + \lambda$ ($\lambda_1 = 6 \dots 7^\circ$). Наружный диаметр гребенок d выбирается таким, чтобы при полном раскрытии головки гребенки не выходили за габариты сводящего кольца, а в рабочем положении не касались бы друг друга.

Длина гребенки ℓ выбирается с таким расчетом, чтобы длина заборной ℓ_1 и калибрующей ℓ_2 частей составляла бы не менее $7 \dots 8$ шагов резьбы.

В рабочем положении центр гребенки располагается выше центра заготовки на величину h (рис. 9.40, а).

Из-за наличия углов λ_1 и φ при заданном превышении h вершины зубьев вдоль оси гребенки располагаются на разных расстояниях C от оси заготовки (рис. 9.40). Расстояние C – очень важный параметр, оказывающий влияние на работоспособность головки, так как от него зависит самоподача инструмента и качество нарезаемой резьбы. Значение C переменено вдоль оси гребенки, вследствие чего изменяются углы резания α_p (угол между касательными, проведенными перпендикулярно к радиусам из центров заготовки и детали) и γ_p (угол между радиусом, проведенным из центра заготовки, и передней гранью), отличающиеся от углов заточки α_3 и γ_3 (см. рис. 9.39).

На рис. 9.40, в показаны три положения вершин зубьев в различных сечениях по длине гребенки: 1) $C > 0$ – вершина зуба лежит выше центра заготовки O_3 ; 2) $C = 0$ – вершина зуба лежит на одной высоте с центром заготовки O_3 ; 3) $C < 0$ – вершина зуба лежит ниже центра O_3 .

Углы резания α_p и γ_p совпадают с углами заточки $\alpha_p = \alpha_z$, $\gamma_p = \gamma_z$ только в случае, когда превышение вершины зуба $C = 0$ и $h = h_r$ (рис. 9.39). При этом $\sin \alpha_p = h/r$. В случае, когда $C > 0$, передний угол увеличивается ($\gamma_p > \gamma_z$), а задний угол уменьшается ($\alpha_p < \alpha_z$). При этом

$$\sin \alpha_p = (h - C)/r.$$

Если $C < 0$, то картина обратная: $\gamma_p < \gamma_z$, $\alpha_p > \alpha_z$. Этот вариант имеет место в начале контакта гребенки с заготовкой.

Только в одном случае при $C > 0$, когда вершина зуба лежит на линии O_3O_r , соединяющей центры заготовки и гребенки, $\alpha_p = 0$, так как нормали к радиусам, проведенным из центров заготовки и гребенки, совпадают (рис. 9.40, а).

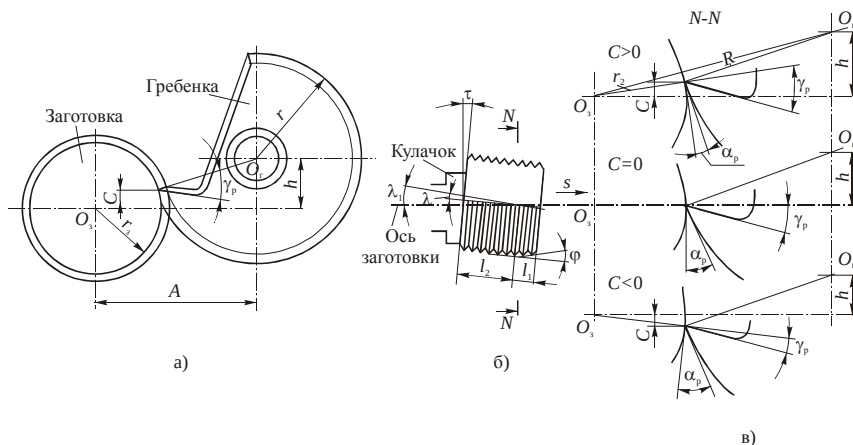


Рис. 9.40. Установка резбонарезной гребенки относительно заготовки

На долю режущей части гребенки приходится удаление припуска из впадин нарезаемой резьбы. Поэтому здесь α_p должно иметь положительное значение. При угле $\alpha_p = 0$ процесс резания прекращается, т.е. наступает окончательное оформление профиля резьбы, и после этого в работу вступают витки калибрующей части. Сечение $N-N$ на этой границе называется профилирующим и по нему производится настройка

головки. Вершины витков калибрующей части за этим сечением еще выше приподнимаются над центром заготовки, и угол α_p получает отрицательные значения. Сама же гребенка превращается как бы в закаленную ведущую гайку, в которую ввинчивается заготовка с нарезанной резьбой. Тем самым обеспечивается процесс самоподачи головки. Экспериментально установлено, что оптимальные значения превышения вершины витка гребенки в этом сечении очень небольшие по величине и равны $C = 0,2$ мм для резьб с шагом $P = 1$ мм и $C = 0,1$ мм для резьб с шагом $P = 2$ мм. С увеличением превышения C при заданном значении λ_1 шероховатость поверхности резьбы увеличивается [22].

Величина превышения C в сечении $N-N$ строго контролируется на специальном приборе, оснащенный двумя микрометрами. У гребенок одного комплекта превышение должно отличаться не более чем на $0,01 \dots 0,02$ мм. Отклонение резьбы по среднему диаметру у гребенок комплекта допускается не более, $0,02$ мм и не более $0,2$ мм между комплектами.

Как следует из рис. 9.40, a межцентровое расстояние между заготовкой и гребенкой в профилирующем сечении

$$A = \sqrt{(r_3 + R)^2 - h^2}.$$

9.6. Инструменты для накатывания резьбы

Накатывание резьбы представляет собой процесс холодного пластического деформирования поверхностных слоев заготовки. При этом деформируемый при большом давлении металл заполняет впадины между витками резьбы инструмента и таким образом на заготовке создается резьба без снятия стружки. Этот метод нашел широкое применение, особенно в массовом и крупносерийном производствах.

К числу его достоинств относятся: 1) высокая производительность (в несколько раз большая, чем при обработке резанием); 2) низкая шероховатость поверхности резьбы; 3) повышенные твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя накатанной резьбы благодаря наклепу; 4) повышенная усталостная прочность детали.

К числу недостатков относятся: 1) высокая стоимость инструментов; 2) пониженная точность резьбы по сравнению со шлифованием; 3) необходимость точного подбора размеров заготовки и инструмента, правильного выбора режима накатки, так как возможно появление перенаклепа, чешуйчатости и отслаивания материала по резьбе.

В литературе [29 и др.] приводится описание большого числа способов накатки, конструкций станков и инструментов для ее осуществления.

Ниже дан анализ только четырех видов инструментов, получивших наибольшее распространение на практике.

Резьбонакатные плоские плашки применяются для накатки наружных резьб различного профиля: метрических, упорных, трапециевидных и др., а также различных видов шурупных резьб, червяков, рифлений, кольцевых и винтовых канавок на заготовках из пластичных материалов.

Плоские плашки (рис. 9.41, *а*) применяются в виде комплекта из двух плашек. Одна плашка крепится неподвижно на столе станка, а вторая связана с ползуном станка и в процессе работы совершает возвратно-поступательное движение. При ходе влево подвижная плашка захватывает заготовку, подаваемую специальным механизмом станка, и протачивает ее по неподвижной плашке.

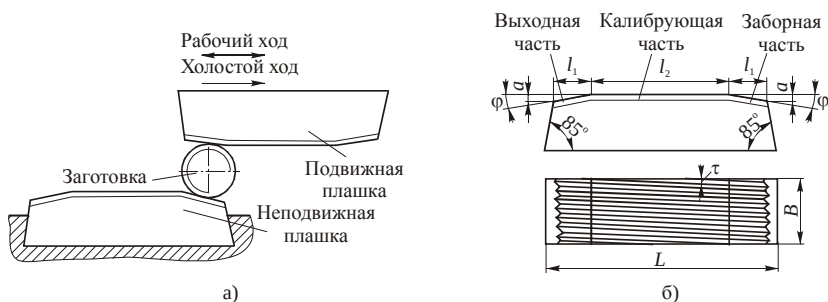


Рис. 9.41. Накатывание резьбы плоскими плашками: *а* – схема накатывания; *б* – элементы резьбы на неподвижной плашке

На поверхностях плашек, обращенных друг к другу, нанесены (фрезерованием и шлифованием) развернутые витки резьбы с углом наклона к направлению движения, равным углу подъема накатываемой резьбы τ . При настройке операции витки подвижной и неподвижной плашек смещают вдоль оси заготовки относительно друг друга на половину шага резьбы ($0,5P$) так, чтобы выступы витков подвижной плашки точно попадали во впадины витков неподвижной плашки.

Неподвижная плашка для лучшего захвата заготовки и постепенного формирования резьбы имеет заборную часть длиной l_1 , выполнен-

ную под углом φ , калибрующую часть ℓ_2 и выходную – сбрасывающую часть, подобную по конструкции заборной части. Они, таким образом, являются взаимозаменяемыми и по мере износа меняются местами.

Для того чтобы подвижная плашка при обратном ходе не захватила накатанную заготовку и не испортила ее резьбу, длина подвижной плашки делается больше длины неподвижной плашки на 15...25 мм.

Заборную часть на подвижной плашке, как правило, не делают, но при накатке резьбы с шагом $P > 1,25$ мм сошлифовывают вершины витков в начале плашки под очень малым углом $\varphi_1 = 7...22'$ с целью повышения стойкости плашки.

Заборная часть неподвижной плашки играет важную роль, так как на ней фактически формируется профиль накатываемой резьбы. Ее длина ℓ_1 должна быть такой, чтобы обеспечить поворот заготовки не менее чем на 1...2 оборота. При накатке резьб с шагом $P > 1$ мм $\ell_1 = (1..2)\pi d_2$, где d_2 – средний диаметр резьбы. Для резьбы повышенной точности $\ell_1 = (3..4)\pi d_2$.

Существуют разные способы оформления заборной части плашек. Наиболее простой из них заключается в сошлифовывании вершин витков под углом $\varphi = 1...3^\circ$. Сами же витки предварительно имеют полный профиль по всей длине плашки. Недостатком такого способа является плохой захват заготовки в начальный момент проката и неравномерная нагрузка витков неподвижной и подвижной плашек. Из-за перегрузки последней она имеет меньшую стойкость, чем неподвижная плашка.

Для улучшения захвата заготовки, особенно при увеличенной длине заборной части ($\ell_1 = 3\pi d_2$), на ней иногда вышлифовывают мелкие поперечные канавки глубиной 0,2...0,7 мм с углом профиля 90° .

На практике у витков на заборной части неподвижной плашки часто делают полный профиль, используя для этого фрезерование и шлифование (после термообработки) витков по контуру. При этом захват заготовки и распределение нагрузки на витки становятся значительно лучше, чем при использовании первого способа, который в основном применяется для накатки резьб с неглубоким профилем и шагом $P < 1$ мм.

Иногда для повышения качества резьб с шагом $P > 1,25$ мм применяют двойную заборную часть. Для этого на витках с полным профилем в конце заборной части делают притупление по вершинам под углом $\varphi_1 < \varphi$. При этом стойкость плашек также повышается благодаря снижению нагрузки на витки, расположенные в начале калибрующей части.

Глубина захвата плашек выбирается такой, чтобы расстояние между плашками в начальной части было больше диаметра заготовки:

$$a = (d_3 - d_1) / 2 + (0,07 \dots 0,2) \text{ мм},$$

где d_3 – диаметр заготовки (определяется экспериментально); d_1 – внутренний диаметр резьбы.

Калибрующая часть плашки служит для окончательного формирования резьбы, поэтому витки на ней имеют полный профиль.

Высота головки витков плашки берется больше высоты ножки резьбы детали на величину запаса на износ, равную $0,015P$, а высота ножки должна быть больше высоты головки и резьбы на величину зазора $\Delta = 0,025P$, чтобы не допустить касания между вершинами витков накатываемой резьбы и впадинами витков плашки. Металл, выдавливаемый витками плашки, должен свободно размещаться во впадинах между витками. В противном случае это приведет к резкому повышению усилий прокатки, снижению стойкости плашек из-за выкрашивания витков и даже к разрыву заготовки.

Длина калибрующей части плашки должна быть достаточной для обеспечения нескольких оборотов заготовки. Обычно она равна $\ell_2 = (2 \dots 3)\pi d_2$. Таким образом, общая длина неподвижной плашки колеблется в пределах $(5 \dots 8)\pi d_2$. Ширина плашки должна быть на $2 \dots 3$ шага больше длины накатываемой резьбы. Высота плашек равна $25 \dots 50$ мм. Для надежного закрепления торцы плашек срезают под углом 85° .

Плашки изготавливают из сталей марок X12M, X6BF и других с термообработкой до твердости HRC_3 59...61. Резьбы диаметром $d=1,5 \dots 25,0$ мм накатываются на станках-автоматах с производительностью до $450 \dots 1600$ шт./мин. Чем меньше диаметр резьбы, тем выше производительность процесса накатывания. Из-за того, что формирование резьбы происходит на очень короткой длине заборной части и степень деформации очень большая, а также из-за погрешностей изготовления и установки плашек на станке точность накатываемой резьбы невысокая, не выше $h6$.

Резьбонакатные ролики (рис. 9.42) используют для накатывания наружных резьб. Этот процесс является более совершенным по сравнению с накатываниями плоскими плашками, хотя и значительно уступает ему по производительности ($60 \dots 80$ шт./мин).

Ролики обеспечивают более точную резьбу, так как работают с малыми давлениями и, кроме того, резьба на роликах вышлифовывается с

высокой точностью и малой шероховатостью поверхности. Установка и регулирование роликов на размер проще и точнее, чем плашек. Благодаря постепенной радиальной подаче роликов нагрузка на витки распределяется более равномерно, поэтому можно производить накатку резьбы даже на полых заготовках, а также на заготовках из малопластичных материалов. Ролики позволяют производить накатку резьб на заготовках диаметром от 2 до 60 мм, что значительно выше, чем плашками.

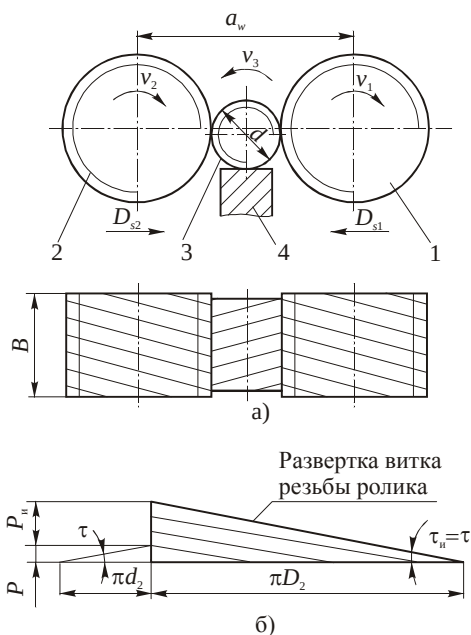


Рис. 9.42. Накатывание резьбы круглыми плашками с радиальной подачей: а – схема накатывания; б – развертка витка резьбы ролика

Как видно из схемы накатывания резьбы роликами (рис. 9.42, а), заготовка помещается между двумя роликами 1 и 2, которые в процессе накатки вращаются в одном направлении, а заготовка – в противоположном. Один из роликов (ведущий) получает вращение от привода станка и радиальную подачу по направлению к заготовке и другому ролику. В результате этого каждый ролик участвует витками своей резьбы в формировании резьбы заготовки.

Заготовка 3 устанавливается на опорную линейку 4 с напаянной твердосплавной пластиной, обеспечивающей линейке высокую износостойкость. Для того чтобы заготовку не выталкивало из

контакта с роликами, ее ось располагают ниже линии центров роликов на величину 0,1...0,6 мм.

По окончании формирования резьбы подача прекращается, и при дальнейшем вращении роликов происходит калибрование резьбы.

Направление резьбы на роликах обратное накатываемой. По оси ролики смещены на полшага относительно друг друга так, что выступы витков одного ролика входят во впадины витков другого ролика. При вращении роликов осевое перемещение заготовки отсутствует. Поэтому можно накатывать резьбу на заготовках с буртиками и на конических поверхностях. Наличие осевого перемещения свидетельствует о погрешностях шага резьбы роликов, а попытки установить для заготовки упоры приводят к порче резьбы.

Основным условием получения правильной резьбы является равенство углов подъема резьбы роликов $\tau_{\text{и}}$ и заготовки τ . Кроме того, с увеличением диаметра роликов из-за снижения удельного давления на заготовку улучшается качество накатываемой резьбы и повышается их жесткость и прочность. Из этого следует, что на роликах должна быть нанесена многозаходная резьба (рис. 9.42, б). При этом угол подъема резьбы на инструменте и заготовке можно найти из выражений:

$$\operatorname{tg} \tau_{\text{и}} = P_{\text{и}} / \pi D_{2\text{и}}; \quad \operatorname{tg} \tau = P / \pi d_2.$$

Приравняв $\tau_{\text{и}} = \tau$, получим

$$\frac{P_{\text{и}}}{P} = \frac{D_{2\text{и}}}{d_2} = i \quad \text{и} \quad D_{2\text{и}} = d_2 i, \quad (9.9)$$

где i – число заходов; $P_{\text{и}}$ – шаг витков резьбы инструмента; d_2 – средний диаметр резьбы детали; $D_{2\text{и}}$ – средний диаметр резьбы ролика.

Многозаходную резьбу на роликах можно получить автоматически без использования делительных устройств при вышлифовывании ее на термически обработанных заготовках с помощью широких многониточных шлифовальных кругов с подачей $P_{\text{и}} = iP$ (рис. 9.43, а). Витки на этих кругах кольцевые, полученные с помощью специальных накаток. Ось круга при шлифовании устанавливается под некоторым углом к оси ролика, равным углу подъема резьбы τ .

Износ роликов часто сопровождается выкрашиванием отдельных витков резьбы. Для восстановления их можно перешлифовывать на другой диаметр с пересчетом диаметра $D_{2\text{и}}$ по уравнению (9.9), но с другим числом заходов i . Наружный диаметр роликов (рис. 9.43, а, б) равен

$$D_{\text{и}} = D_{2\text{и}} + 2h_{1\text{max}},$$

где $h_{1\max}$ – наибольшая высота головки резьбы ролика (для метрической резьбы $h_{1\max} = 0,325P$).

При этом наименьшая ширина площадки по вершинам витков ролика должна быть не меньше 0,75 ширины площадки теоретического профиля.

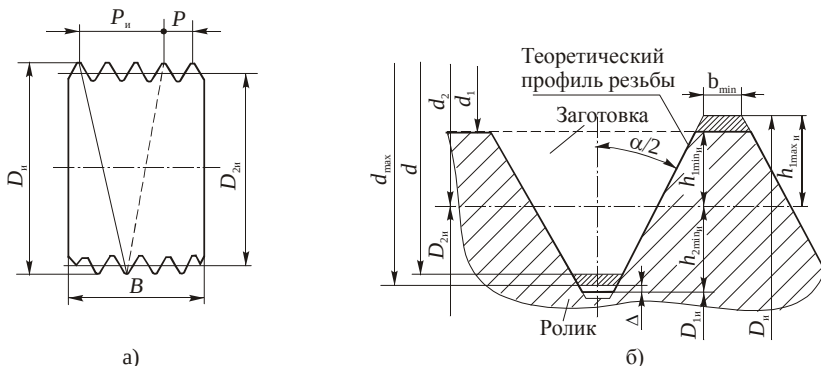


Рис. 9.43. Накатный ролик: а – основные элементы ролика; б – схема для определения элементов профиля резьбы ролика

Высота ножки резьбы ролика $h_{2\min}$ должна быть больше высоты головки накатываемой резьбы (рис. 9.43, б), чтобы можно было гарантировать зазор $\Delta = 0,1 \dots 0,2$ мм между впадиной резьбы ролика и наружной поверхностью заготовки. Отсутствие такого зазора приводит к бочкообразности и овальности накатанной резьбы.

На практике ролики изготавливают диаметром $D_n = 90 \dots 250$ мм, шириной $B = 45 \dots 250$ мм. Их используют на станках-автоматах с межцентровыми расстояниями между роликами $L = 90 \dots 435$ мм. Изготавливаются ролики из тех же сталей, что и плашки.

Кроме рассмотренной схемы накатки резьбы и конструкции роликов существует также много других схем, например накатка тремя роликами, планетарная накатка роликом и сегментной плашкой, накатка роликами с тангенциальной и осевой подачами и др. [13, 22, 23, 29].

Накатники (раскатники) применяются для получения внутренних резьб (рис. 9.44). Они представляют собой стержни с нарезанной резьбой, соответствующей профилю накатываемой резьбы, с заборной и калибрующей частями и хвостовиком. Внешне они подобны метчикам,

но, в отличие от них, не имеют стружечных канавок и, соответственно, режущих зубьев.

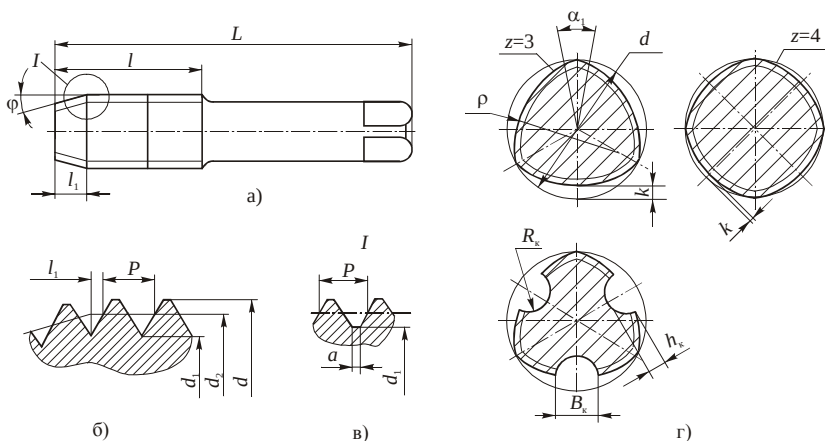


Рис. 9.44. Накатник для внутренней резьбы: а – конструкция; б, в – профили продольного сечения накатника; г – профили поперечного сечения накатника

Формирование резьбы осуществляется также методом холодного пластического деформирования, но, в отличие от роликов и плашек, при этом имеет место не трение качения, а трение скольжения, вызывающее повышенный износ инструмента. По сравнению с метчиками накатники обладают большей прочностью, обеспечивают получение точных резьб с низкой шероховатостью поверхности, повышение прочности резьбы (до 20%). Наибольшее применение они нашли в приборостроении при накатке резьбы в пластичных материалах, в листовых заготовках из цветных металлов с длиной резьбы меньше диаметра, а также при накатке резьбы в глухих отверстиях в вязких и мягких сталях.

Накатники из быстрорежущих сталей обеспечивают повышение стойкости до 10 раз по сравнению с метчиками только на малых диаметрах ($d = 3 \dots 5$ мм), но с увеличением диаметра резьбы стойкость их резко уменьшается. На $d = 10 \dots 12$ мм их преимущества полностью теряются. Объясняется это сложными условиями работы накатников и высокой трудоемкостью их изготовления. При $d > 10$ мм эти накатники применяют только для повышения прочности и точности резьбы.

Твердосплавные накатники (монолитные, с напайными пластинами или механически закрепляемыми вставками для больших диаметров) дают значительное (от 8 до 100 раз) повышение стойкости, но очень

дороги и сложны в изготовлении. При небольших диаметрах ($d < 20$ мм) они уступают по прочности стальным и не нашли применения в производстве.

Заборная часть накатников представляет усеченный конус с резьбой полного профиля. Угол конуса $\varphi = 45^\circ$ для глухих отверстий и $\varphi = 10...15^\circ$ для сквозных. Диаметр отверстия под накатку можно ориентировочно подсчитать по формуле

$$d_0 = d - 0,6\sqrt{P},$$

с последующей экспериментальной проверкой.

При определении диаметров резьбы накатника нужно учитывать тип ее контура: открытый или закрытый. Соответственно у накатников для получения открытого контура внутренний диаметр резьбы на заборном конусе не ограничен и в процессе формирования резьбы не участвует (рис. 9.44, б), т.е. по внутреннему диаметру между накатником и заготовкой имеется зазор.

При закрытом контуре (рис. 9.44, в) на внутренний диаметр d_1 устанавливается жесткий допуск, так как он формирует вершины витков накатываемой резьбы. Зазор между заготовкой и раскатником отсутствует. Такой контур обычно используется при накатывании точных резьб с тугой посадкой.

При открытом контуре вследствие недостаточного заполнения металлом впадин резьбы накатника на вершинах витков накатанной резьбы образуются складки (кольцевые канавки). Поэтому накатники испытывают меньшие напряжения в резьбе и крутящий момент. Их стойкость выше, чем у накатников для резьб с закрытым контуром.

С целью обеспечения более равномерной нагрузки на отдельные витки резьбы на практике применяют различные формы заборной части: с криволинейной образующей (по параболе, гиперболе, окружности), с переменной высотой витков и др. Но это возможно только при большой длине заборной части, равной $\ell_1 > (3...4)P$. За счет этого при накатке резьбы в сквозных отверстиях можно получить существенное повышение стойкости инструмента.

Калибрующая часть накатника предназначена для окончательного формирования и калибровки резьбы. Она имеет цилиндрическую резьбу полного профиля. Ее длина равна $\ell_2 > (5...10)P$. Средний диаметр резьбы инструмента $d_{2н}$ принимается больше среднего диаметра накатываемой резьбы на $2/3$ допуска на d_2 , а наружный диаметр d_n больше диа-

метра резьбы $d_{\text{и}} = d + 0,15P$ с учетом упругих деформаций восстановления резьбы, имеющих место после вывода накатника из отверстия.

Внутренний диаметр при накатке резьбы с закрытым контуром может быть рассчитан по формуле

$$d_{\text{ин}} = d_1 + 0,6\delta_1,$$

где δ_1 – допуск на внутренний диаметр резьбы.

В целях уменьшения момента трения и облегчения формирования резьбы накатники в сечении, перпендикулярном к оси, изготавливаются с многогранным или криволинейным профилем, имеющим переменную величину площади контакта накатника и заготовки, и наличием зазора между ними (рис. 9.44, з). Для получения фасонных профилей используют затыловочные станки. От правильного выбора формы и размеров поперечного сечения зависят прочность и стойкость накатников, сила трения при накатке, точность и шероховатость поверхности резьбы. При этом число граней обусловлено размерами резьбы. Так, для резьбы до М6 рекомендуется трех- или четырехгранные, для М6...М20 – шестигранные, а для М20...М36 – шести- или восьмигранные накатники. Для повышения точности резьб необходимо стремиться к увеличению числа граней, хотя при этом увеличивается момент трения из-за худшего проникновения СОЖ и увеличения степени наклепа резьбы.

Для снижения крутящего момента на нерабочей части граней накатника выполняют, например, смазочные канавки размером $B_{\text{к}} \geq 0,5 \dots 0,7$ мм, $h_{\text{к}} = 0,5P$ (рис. 9.44, з).

Во избежание защемления накатника в отверстии и для снижения крутящего момента на калибрующей части предусматривается небольшой обратный конус по наружному диаметру в пределах 0,05...0,10 мм на 100 мм длины.

Резьбонакатные головки используют для накатки наружных резьб на специальном или универсальном оборудовании и даже вручную. Они представляют собой сборный инструмент, использующий в качестве рабочих элементов ролики небольших диаметров, подобно резьбонарезным головкам. Имеется большое число вариантов конструктивного исполнения резьбонакатных головок. На рис. 9.45 приведены два варианта таких головок: с аксиальной (осевой) подачей заготовок и тангенциальной подачей головки.

У головок с аксиальной подачей ролики имеют кольцевые витки, смещенные по оси на величину P/n , где n – число роликов ($n = 3 \dots 4$). Ролики устанавливаются под некоторым углом к оси заготовки, близким к углу τ подъема резьбы. На роликах для лучшего захода имеется

заборная часть длиной $\ell_{1\min} = 1,5P$ с двух сторон как с полным, так и с неполным профилем резьбы. Головки применяют для накатки резьбы на длинных и полых заготовках с толщиной стенки 2...4 мм. Резьбонакатная головка, показанная на рис. 9.45, *а*, реверсивная, приводимая во вращение воротком. Имеются более сложные конструкции: самооткрывающиеся в конце хода, с осевой и радиальной подачами роликов и др. Самооткрывающиеся головки не требуют свинчивания, поэтому более производительны. Они могут быть вращающимися и невращающимися. Последние применяют на револьверных станках с вращением заготовки.

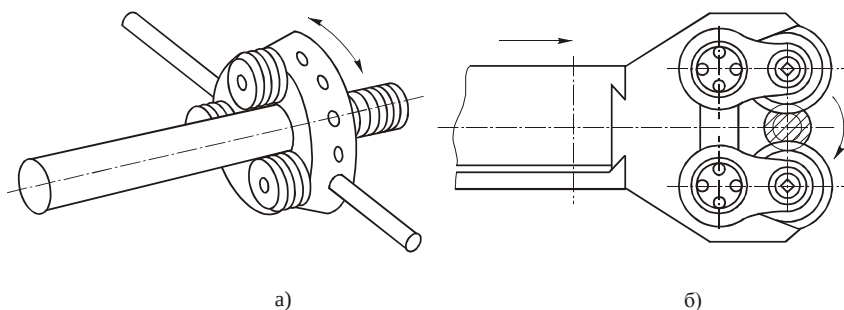


Рис. 9.45. Резьбонакатные головки: *а* – аксиальная; *б* – тангенциальная

При накатке резьбы на длине $(2...3)P$ в начале захода используют принудительную подачу, равную шагу резьбы. Затем подачу отключают, и процесс идет с самоподачей. Принудительная подача обычно приводит к снижению стойкости роликов.

Резьбонакатные головки используют для накатки метрических, трубных и трапециевидных резьб диаметром $d = 12...90$ мм с шагом до $P = 10$ мм. Число роликов у крупных головок может достигать до 10.

На рис. 9.45, *б* показана схема накатки резьбы с тангенциальной подачей головки, закрепленной на суппорте станка. Наибольшее применение нашли головки с двумя роликами. Они бывают как с синхронным (через зубчатую передачу), так и с несинхронным вращением роликов. Витки роликов винтовые, с направлением резьбы, обратным направлению резьбы заготовки, и с числом заходов, обеспечивающим равенство углов подъема резьбы на роликах и заготовке. Число заходов зависит от шага резьбы и находится в пределах $i = 2...6$. Оси роликов параллельны оси заготовки. Ширина роликов больше длины накатываемой резьбы на

величину не менее одного шага. Профиль витков одного ролика смещен на $P/2$ относительно профиля другого ролика.

В начальный момент ролики касаются наружной поверхности заготовки. Затем головке задается тангенциальная подача. Конец процесса накатывания резьбы наступает тогда, когда оси роликов окажутся в одной вертикальной плоскости с осью заготовки.

Резьбонакатные головки используются для накатки резьб диаметром $d = 3 \dots 52$ мм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Резьбовые резцы и гребенки. Их конструктивные параметры и схемы резания.
2. Почему у призматических резьбовых резцов профиль в сечении, перпендикулярном к задней поверхности, несимметричен?
3. Типы резьбонарезных фрез. Кинематика и схемы формирования резьбы при работе гребенчатыми и дисковыми фрезами.
4. В чем заключается способ вихревого нарезания резьбы? Устройство и применение головок для вихревого нарезания резьбы.
5. Основные конструктивные и геометрические параметры метчиков для нарезания резьбы. Типы метчиков и их назначение.
6. Определение толщины срезаемой стружки, приходящейся на один зуб метчика. От каких параметров она зависит?
7. В чем заключается принцип комплектования метчиков?
8. Как назначаются допуски на основные параметры метчиков?
9. Как работает метчик-протяжка? В чем его достоинства и когда он применяется?
10. Устройство и геометрические параметры резьбонарезных плашек.
11. Как рассчитываются параметры резьбонарезных круглых плашек?

10. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС

Для нарезания зубьев цилиндрических колес применяются зуборезные инструменты. Это наиболее сложные и дорогостоящие из всех видов лезвийных инструментов, так как содержат большое число высокоточных режущих фасонных кромок, изготавливаются из высококачественных инструментальных материалов и характеризуются высокой трудоемкостью изготовления и сложностью контроля многочисленных параметров.

Нарезание зубьев цилиндрических колес может производиться либо методом копирования, либо методом обкаточного огибания.

При **методе копирования** профиль режущих кромок полностью соответствует профилю впадин между зубьями колеса. По такому методу работают дисковые и пальцевые фасонные фрезы, зубодолбежные многолезцовые головки, протяжки. Последние два вида инструментов обеспечивают наивысшую производительность, так как выбирают металл одновременно из всех впадин. Но в то же время они являются наиболее дорогостоящими, сложными в изготовлении и применяются только в массовом производстве.

Достоинством метода копирования является простая кинематика станка. Однако точность изготовления зубьев колес относительно низка из-за неизбежных погрешностей изготовления фасонных зубьев инструментов и установки их относительно заготовки.

При **методе обкаточного огибания** centroиды инструмента и нарезаемого колеса катятся друг по другу без скольжения, а профиль нарезаемых зубьев колеса формируется как огибающая различных положений режущих кромок при зубонарезании. Форма режущих зубьев у этих инструментов не совпадает с профилем впадин между зубьями нарезае-

мых колес и определяется в результате достаточно сложных расчетов. По этому принципу работают зуборезные гребенки, червячные фрезы, долбяки, зубострогальные резцы, головки для нарезания конических колес и др. Достоинство этих инструментов – универсальность. Ими можно нарезать колеса данного модуля с различным числом зубьев. При этом точность нарезаемых колес выше точности колес, обработанных по методу копирования. Недостатки: сложные кинематика зуборезных станков и конструкция самих инструментов.

Проектирование зуборезных инструментов заключается в определении формы и размеров режущих зубьев и базируется на законах зацепления зубчатых передач. Наиболее важные из них рассмотрены в разд. 10.1. Там же даны определения и обозначения основных параметров зубчатых колес и передач, которые стандартизированы (ГОСТ 16530–83, ГОСТ 16531–83, ГОСТ 16532–70).

В связи с тем, что подавляющее большинство зубчатых колес, применяемых в машиностроении, имеют цилиндрическую форму и зубья эвольвентного профиля, то в этой главе рассматриваются вопросы проектирования режущих инструментов для нарезания именно таких колес.

В разд. 10.6 на примере шлиценарезных червячных фрез с использованием метода обкаточного огибания рассмотрены вопросы особенностей проектирования инструментов для нарезания зубьев с неэвольвентным профилем.

С особенностями проектирования инструментов для нарезания других типов колес и с другими видами зацепления (Новикова, циклоидальное и др.) можно ознакомиться в специальной литературе.

10.1. Основные сведения об эвольвентном зацеплении

Уравнение эвольвенты. Профиль боковых сторон зубьев зубчатых колес с эвольвентным зацеплением представляет собой две симметрично расположенные эвольвенты.

Эвольвента – это плоская кривая с переменным радиусом кривизны, образованная некоторой точкой на прямой, обкатывающейся без скольжения по окружности, диаметром (радиусом) $d_b(r_b)$, называемой **основной окружностью**.

На рис.10.1, *а* показано построение эвольвенты, а на рис. 10.1, *б* – расчетная схема для определения координат точки *M*, находящейся на прямой *BM*. Из условия обката без скольжения $BM = A\bar{B}$.

Здесь *BM* – нормаль к эвольвенте и одновременно радиус ρ_M кривизны эвольвенты в точке *M*; θ_M – угол, отсчитываемый от начала эвольвенты до точки *M*; ν_M – угол развернутости эвольвенты; α_M – угол профиля эвольвенты в точке *M* (угол между касательной к эвольвенте и радиусом r_M).

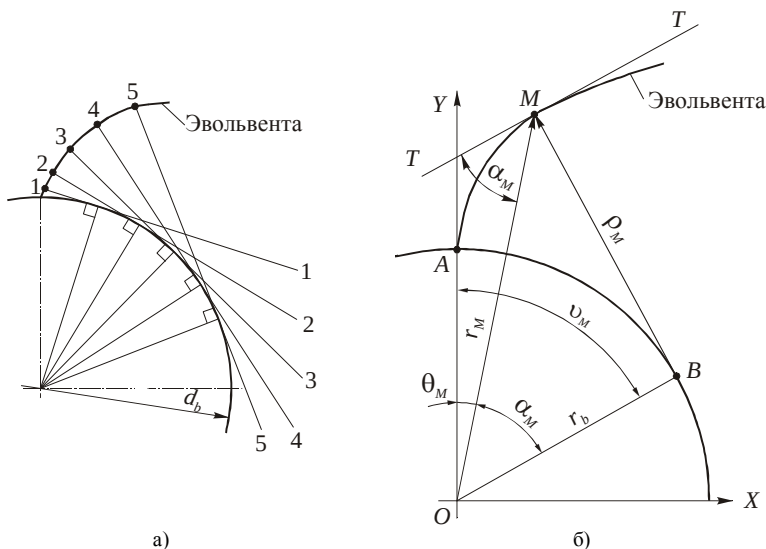


Рис. 10.1. Эвольвентная кривая: *а* – построение эвольвенты; *б* – расчетная схема

Так как $BM = A\bar{B}$, то $r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_M = r_b \cdot \nu_M$. Следовательно, $\nu_M = \operatorname{tg} \alpha_M$, $\theta_M = \nu_M - \alpha_M$ и $\theta_M = \operatorname{tg} \alpha_M - \alpha_M = \operatorname{inv} \alpha_M$.

Угол $\theta_M = \operatorname{inv} \alpha_M$ называется инволютой или эвольвентным углом. В справочниках имеются специальные таблицы инволют: $\operatorname{inv} \alpha_M = f(\alpha_M)$.

Уравнение эвольвенты в полярных координатах на основании рис. 10.1 выглядит так:

$$\begin{cases} \operatorname{inv} \alpha_M = \operatorname{tg} \alpha_M - \alpha_M; \\ \cos \alpha_M = \frac{r_b}{r_M}. \end{cases} \quad (10.1)$$

Чтобы построить эвольвенту, нужно задать значение радиуса r_M некоторой точки M и при определенном радиусе основной окружности r_b найти значение $\cos \alpha_M$, а затем по углу α_M найти эвольвентный угол $\theta_M = \operatorname{inv} \alpha_M$.

Уравнение эвольвенты можно записать также в декартовых координатах $X-Y$. Из $\triangle OBM$ следует, что

$$r_M^2 = r_b^2 + r_b^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_M, \quad \operatorname{tg} \alpha_M = \sqrt{\frac{r_M^2}{r_b^2} - 1}. \quad (10.2)$$

Координаты точки M , т.е. уравнение эвольвенты:

$$\begin{cases} x_M = r_M \sin \theta_M; \\ y_M = r_M \cos \theta_M; \\ \theta_M = \operatorname{inv} \alpha_M = \sqrt{\frac{r_M^2}{r_b^2} - 1} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{r_M^2}{r_b^2} - 1}. \end{cases} \quad (10.3)$$

Радиус основной окружности r_b найдем для точки, лежащей на делительной окружности радиуса $r = mz/2$, в которой угол профиля стандартного эвольвентного зацепления $\alpha = 20^\circ$. Тогда из уравнения (10.1) найдем, что

$$r_b = \frac{mz}{2} \cos \alpha. \quad (10.4)$$

Характерной особенностью эвольвенты является переменность угла профиля α_M и радиуса кривизны ρ_M в каждой из ее точек.

Из рис. 10.1,б следует, что

$$\rho_M = r_b \operatorname{tg} \alpha_M = \frac{mz}{2} \cos \alpha \operatorname{tg} \alpha_M.$$

При $z \rightarrow \infty$ $\rho_M \rightarrow \infty$, то есть эвольвента превращается в прямую линию, которую можно рассматривать как частный случай эвольвенты. Отсюда следует, что характер эвольвентного зацепления не изменится,

если колесо будет сцепляться с рейкой, имеющей $z = \infty$ и прямолинейный профиль зубьев с углом $\alpha = 20^\circ$, то есть становится возможным нарезание эвольвентных колес инструментами реечного типа (гребенки, червячные фрезы) методом обкаточного огибания.

Основные параметры эвольвентного зацепления. На рис. 10.2 показано зацепление двух зубчатых колес с эвольвентным профилем. Рассмотрим основные параметры зацепления, их определения и стандартные обозначения.

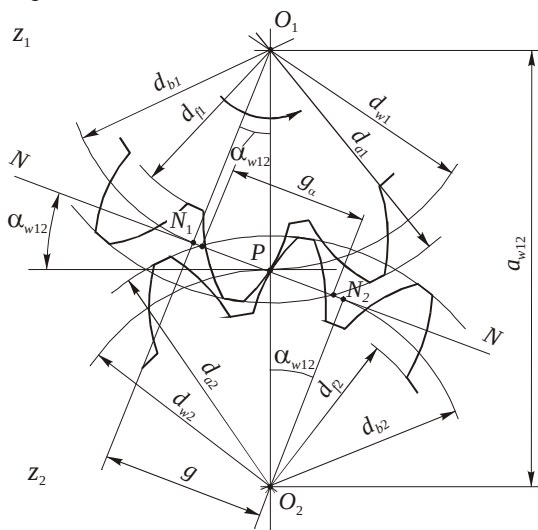


Рис. 10.2. Эвольвентное зацепление зубчатых колес

В отличие от принятого ранее, обозначение всех параметров производится строчными, а не заглавными буквами с индексами, указывающими их принадлежность колесу, инструменту, типу окружности и виду сечения.

Стандартом предусмотрены три группы индексов:

- первая группа: n , t , x — означает вид сечения, соответственно, нормальный, торцевой

(окружной), осевой;

- вторая группа: a , f , b , w , y — означает, что параметр относится соответственно к окружностям выступов, впадин, основной, начальной и любой concentричной окружности. Для делительной окружности индекс не указывается;

- третья группа индексов: 1, 2, 0 — означает, что параметр относится соответственно к шестерне, колесу, зуборезному инструменту.

Порядок использования индексов определяется номером группы, т.е. вначале предпочтение отдается индексам первой группы, затем второй и т.д.

Некоторые индексы разрешается опускать в случаях, исключающих возникновение недоразумений или не имеющих применения по определению. Например, у прямозубых цилиндрических колес не используются индексы первой группы. В ряде случаев некоторые индексы с целью сокращения записи также опускаются.

Рассмотрим зацепление двух прямозубых цилиндрических (рис. 10.2) колес: с меньшим числом зубьев (z_1), называемого шестерней, и с большим числом зубьев (z_2), называемого колесом; соответственно с центрами колес в точках O_1 и O_2 . В процессе обката шестерни с колесом происходит качение без скольжения двух центроид – окружностей, соприкасающихся в полюсе зацепления – P . Эти окружности называются **начальными**, а их диаметры (радиусы) обозначаются с индексом w : d_{w1} (r_{w1}), d_{w2} (r_{w2}). Для некорректированных колес эти окружности совпадают с делительными окружностями, обозначение диаметров (радиусов) которых дается без индексов первой и второй групп, т.е. для шестерни – $d_1(r_1)$, для колеса – $d_2(r_2)$.

Делительная окружность – окружность, на которой шаг между зубьями и угол профиля равны им же на делительной прямой зубчатой рейки, сцепленной с колесом. При этом шаг $P = \pi m$ – расстояние между двумя соседними одноименными сторонами профиля. Отсюда диаметр делительной окружности колеса равен

$$d = Pz / \pi = mz . \quad (10.5)$$

Модуль зуба $m = P / \pi$ – величина условная, имеющая размерность в миллиметрах (мм) и используемая как масштаб для выражения многих параметров зубчатых колес. В зарубежной практике в этом качестве используется питч – величина обратная модулю.

Основная окружность – это окружность, от которой образуется эвольвента. Все параметры, относящиеся к ней, обозначаются с индексом b , например, диаметры (радиусы) колес в зацеплении: d_{b1} (r_{b1}), d_{b2} (r_b).

Касательно к основным окружностям через полюс зацепления P проходит прямая $N-N$, а ее участок N_1-N_2 называется **линией зацепления**. По ней в процессе обката перемещается точка контакта сопрягаемых профилей колес. N_1-N_2 называется номинальной (теоретической) линией зацепления, обозначаемой буквой g . Расстояние между точками пересечения ее с окружностями выступов колес называется **рабочим участком линии зацепления** и обозначается g_a .

В процессе обката зубчатых колес точка контакта профилей перемещается в пределах активного (рабочего) участка линии зацепления g_a ,

которая является нормалью к профилям обоих колес в этих точках и одновременно общей касательной к обоим основным окружностям.

Угол между линией зацепления и перпендикуляром к линии, соединяющей центры сопрягаемых колес, называется **углом зацепления**. У корригированных колес этот угол обозначается α_{w12} . для некорригированных колес $\alpha_{w12} = \alpha_0$.

Межцентровое расстояние некорригированных колес

$$a_{w12} = r_{w1} + r_{w2} = r_1 + r_2 = m(z_1 + z_2) / 2. \quad (10.6)$$

Окружности выступов и впадин – окружности, проходящие соответственно через вершины и впадины зубьев колес. Их диаметры (радиусы) обозначаются: $d_{a1}(r_{a1})$, $d_{f1}(r_{f1})$, $d_{a2}(r_{a2})$, $d_{f2}(r_{f2})$.

Шаги зубьев колес – P_b , P_b , P_n , P_x – это расстояния между одноименными сторонами профиля, замеренные:

а) по дуге делительной окружности в торцевом сечении – окружной (торцевой) шаг $P_t = \pi d / z$;

б) по дуге основной окружности – основной шаг $P_b = \pi d_b / z$;

в) по контактной нормали (линии зацепления) – основной нормальный шаг P_{bn} ;

г) по нормали к направлению зубьев и по оси (у винтовых передач) – нормальный шаг P_n и осевой шаг P_x .

Коэффициент перекрытия ε – отношение активной (рабочей) части линии зацепления к основному нормальному шагу:

$$\varepsilon = g_a / P_{bn}. \quad (10.7)$$

Окружная (торцевая) толщина зуба S_t – длина дуги делительной окружности, заключенная между двумя сторонами зуба. Толщина, измеренная по хорде, обозначается как $\bar{S}$.

Окружная ширина впадины между зубьями e – расстояние между разноименными сторонами профиля по дуге делительной окружности.

Высота головки зуба h_a – расстояние между окружностями выступов и делительной: $h_a = r_a - r$.

Высота ножки зуба h_f – расстояние между окружностями делительной и впадин: $h_f = r - r_f$.

Высота зуба: $h = h_a + h_f$.

Рабочий участок профиля зуба – геометрическое место точек контакта профилей сопрягаемых колес, определяется как расстояние от вершины зуба до точки начала эвольвенты. Ниже последней следует переходная кривая.

Переходная кривая профиля зуба – часть профиля от начала эвольвенты, т.е. от основной окружности до окружности впадин. При методе копирования соответствует форме головки зуба инструмента, а при методе обкатки образуется вершинной кромкой режущего инструмента и имеет форму удлиненной эвольвенты (для инструментов реечного типа) или эпициклоиды (для инструментов типа колеса).

Другие параметры и обозначения будут приведены ниже по мере использования.

Понятие об исходном контуре рейки. Как было показано выше, частным случаем эвольвенты при $z = \infty$ является прямая линия.

Это дает основание использовать в эвольвентном зацеплении рейку с прямобочными зубьями. При этом любое зубчатое колесо данного модуля независимо от числа зубьев может быть сцеплено с рейкой того же модуля. Отсюда возникла идея обработки колес методом обкатки. В зацеплении колеса с рейкой (рис. 10.3) радиус начальной окружности последней равен бесконечности, а сама окружность превращается в начальную прямую рейки. Линия зацепления N_1N_2 проходит через полюс P касательно к основной окружности колеса и перпендикулярно к боковой стороне профиля зуба рейки. В процессе зацепления начальная окружность колеса обкатывается по начальной прямой рейки, а угол зацепления становится равным углу профиля зуба рейки α .

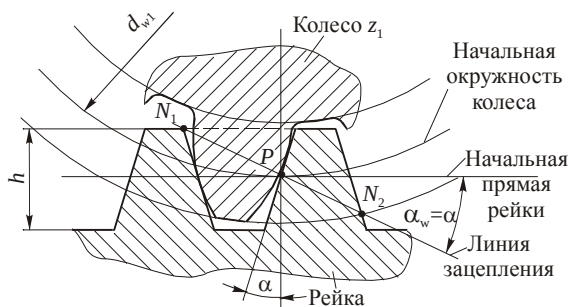


Рис. 10.3. Зацепление зубчатой рейки с колесом

Так как профиль зубьев рейки – прямая линия, это в значительной мере упрощает контроль линейных параметров зубьев и угла профиля. С этой целью стандартами установлено понятие **исходного контура зубчатой рейки** (рис. 10.4, а).

В соответствии со стандартами, принятыми в нашей стране для эвольвентного зацепления, исходный контур имеет следующие параметры зубьев в зависимости от модуля:

- угол профиля $\alpha = 20^\circ$;
- коэффициент высоты головки $h_a^* = 1$;
- коэффициент высоты ножки $h_f^* = 1,25$;
- коэффициент радиального зазора $c^* = 0,25$ или $0,3$;
- коэффициент граничной (рабочей) высоты зуба $h_L^* = 2$;
- шаг зубьев $P = \pi m$;
- толщина зуба S и ширина впадины e : $S = e = 0,5P = \pi m / 2$.

Делительная прямая рейки проходит по середине рабочей высоты зуба h_L .

Для зуборезных инструментов основные параметры зубьев по аналогии с изложенным выше задаются параметрами **исходной инструментальной рейки** (рис. 10.4, б). Так как зубья режущего инструмента обрабатывают впадину между зубьями колеса и могут нарезать колеса с модифицированным (фланкированным) профилем, между названными исходными контурами имеются существенные различия, а именно:

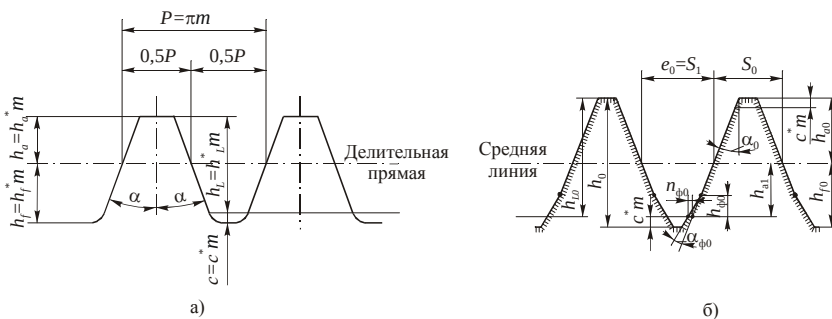


Рис. 10.4. Исходные контуры: а – зубчатой рейки; б – инструментальной рейки

1. Высота головки зуба исходной инструментальной рейки $h_{a0} = (h_{f0}^* + c_0^*)m = 1,25m$, т.е. коэффициент высоты головки $h_{a0}^* = 1,25$. Высота ножки зуба $h_{f0} = 1,25m$, а полная высота зуба $h_0 = h_{a0} + h_{f0} = 2,5m$.

2. Если нарезаемое колесо имеет срез у головки (модифицированный профиль), то ножка зуба инструментальной рейки должна иметь утолщение с параметрами $h_{\phi 0}, \alpha_{\phi 0}, n_{\phi 0}$.

3. Толщина зуба у зубчатой рейки $S = \pi m / 2$, а у инструментальной рейки при нарезании колес с модифицированным профилем зубьев

$$S_0 = \pi m / 2 \pm \Delta S_0 \quad (10.8)$$

Поправка ΔS_0 берется из справочников в зависимости от величины модуля зуба. Знак «+» берется для чистовых, а знак «-» — для черновых инструментов. В первом случае происходит утонение зубьев нарезаемого колеса с целью создания бокового зазора между зубьями сцепляемых колес, во втором случае утолщение, в результате чего нарезаемые зубья получают припуск на чистовую обработку.

У колес с обычным (немодифицированным) профилем зубьев изменение толщины нарезаемых зубьев можно получить путем смещения инструментальной рейки относительно центра колеса и утолщение ее зубьев у ножки не требуется.

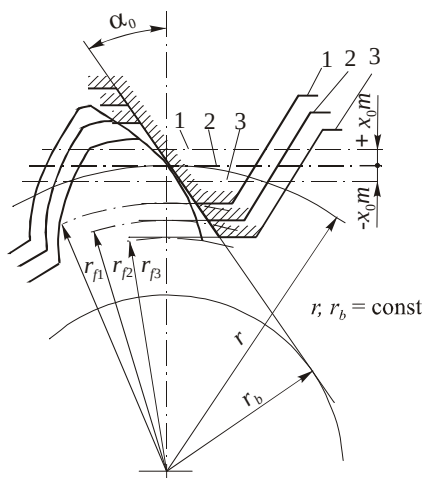


Рис. 10.5. Схема высотного корригирования зубчатого колеса: 1 – положительное смещение; 2 – нулевое смещение; 3 – отрицательное смещение

инструментальной рейки относительно центра нарезаемого колеса. Такое смещение принято считать положительным, если рейка отводится от центра коле-

Параметры зацепления корригированных зубчатых колес. Корригирование (исправление) колес дает возможность улучшить зубчатое зацепление по сравнению с нормальным зацеплением в отношении трения, износа и прочности зубьев, уменьшить вероятность подреза ножки зубьев при малом их числе и др.

Применительно к долбякам корригирование дает возможность получения задних углов на режущих кромках (см. ниже).

Из известных методов корригирования на практике наибольшее применение нашло **высотное корригирование**, которое осуществляется путем смещения профиля исходной инструмен-

са, и отрицательным, когда она приближается к его центру (рис. 10.5). Величина смещения оценивается произведением $x_0 \cdot m$, где x_0 – коэффициент смещения.

При положительном смещении высота головки зуба нарезаемого колеса h'_{a1} увеличивается на величину $x_0 \cdot m$, а высота ножки h'_{f1} уменьшается на ту же величину. При отрицательном смещении, наоборот, высота головки зуба уменьшается, а высота ножки увеличивается. Полная высота зуба колеса в обоих случаях остается неизменной. При этом положение делительной и основной окружностей колеса постоянно и не зависит от величины смещения, то неизбежно изменение толщины зуба нарезаемого колеса по делительной окружности из-за смещения делительной прямой рейки относительно начального положения на величину $\pm x_0 m$. Как видно из рис. 10.6, толщина зуба по делительной окружности у корригированного колеса при смещении рейки инструмента

$$S'_{1,3} = \pi m / 2 \pm 2\Delta S = \pi m / 2 \pm 2x_0 m t g \alpha_0, \quad (10.9)$$

где $\Delta S = x_0 m t g \alpha_0$.

Знак «+» берется при положительном, а знак «-» – при отрицатель-

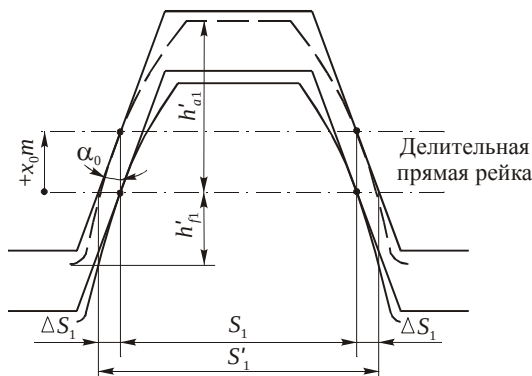


Рис. 10.6. Изменение толщины зуба на делительной окружности при положительном смещении инструментальной рейки

ном смещении.

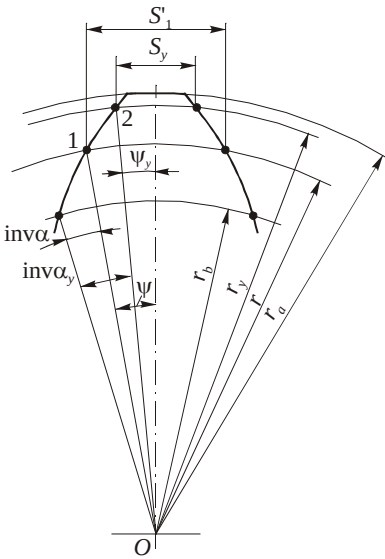


Рис. 10.7. Толщина зуба S_y на окружности радиуса r_y

При расчетах зуборезных инструментов, например долбяков, зубья которых корригированы, возникает необходимость определения толщины зуба на окружности любого радиуса – r_y , concentric с делительной окружностью радиусом r .

Из рис. 10.7 и уравнения эвольвенты (10.1) следует, что толщина зуба по окружности радиуса r_y в точке 2 равна

$$S_y = 2r_y \psi_y,$$

где $\psi_y = \psi - (\text{inv} \alpha_y - \text{inv} \alpha)$; ψ и ψ_y – углы между линией симметрии зуба и радиусами, проведенными в точке 1 на делительной окружности и в точке 2 на окружности радиусом r_y ; $\text{inv} \alpha$ и $\text{inv} \alpha_y$ – эвольвентные углы в этих точках.

Так как толщина зуба на делительной окружности S'_1 – величина известная (10.9), а угол $\psi = S'_1 / 2r$, то S_y можно определить по формулам:

для корригированных колес

$$S_y = 2r_y (S'_1 / 2r + \text{inv} \alpha - \text{inv} \alpha_y), \quad (10.10)$$

для некорригированных колес при $S = \pi m / 2$

$$S_y = d_y (\pi m / 2d + \text{inv} \alpha - \text{inv} \alpha_y).$$

Здесь углы α и α_y , как следует из (10.4), определяются по следующим формулам: $\cos \alpha = r_b / r$, $\cos \alpha_y = r_b / r_y$.

На рис. 10.8 представлено зацепление двух колес с корригированными зубьями. Его главная особенность заключается в том, что начальные окружности r_{w1} и r_{w2} , проходящие через полюс зацепления P , не совпадают с делительными окружностями r_1 и r_2 . По этой причине угол зацепления α_{w12} колес не равен углу профиля исходной рейки, толщины

зубьев на делительной окружности меняются, а также меняются соотношение высот головок и ножек зубьев, диаметры окружностей выступов, впадин и межцентровое расстояние между колесами.

Угол зацепления α_{w12} – это угол между линией зацепления N_1N_2 и перпендикуляром к прямой, соединяющей центры колес (для корригированных колес $\alpha_{w12} \neq \alpha$).

Формулу для расчета α_{w12} , а точнее $\text{inv}\alpha_{w12}$, найдем в следующей последовательности:

1. Запишем уравнение для расчета толщин зубьев на начальной окружности S_{w1} и S_{w2} для шестерни и колеса на основании формулы (10.10), сменив индекс u на w .

2. Сумма толщин зубьев колес, находящихся в зацеплении, равна шагу на начальной окружности:

$$S_{w1} + S_{w2} = P_{w12}. \quad (10.11)$$

3. Путем алгебраических преобразований найдем эвольвентный угол $\text{inv}\alpha_{w12}$.

Толщины зубьев на начальных окружностях шестерни и колеса на основании уравнения (10.10)

$$\begin{cases} S_{w1} = 2r_{w1}(S'_1 / 2r_1 + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{w12}); \\ S_{w2} = 2r_{w2}(S'_2 / 2r_2 + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{w12}), \end{cases} \quad (10.12)$$

где r_1, r_2 – радиусы делительных окружностей ($r_1 = mz_1 / 2$; $r_2 = mz_2 / 2$); S'_1, S'_2 – толшины зубьев по делительным окружностям (см. 10.9).

Шаг зубьев на начальных окружностях шестерни и колеса будет один и тот же:

$$P_{w12} = 2\pi r_{w1} / z_1 = 2\pi r_{w2} / z_2. \quad (10.13)$$

Из уравнения (10.13) следует, что

$$\frac{r_{w1}}{r_{w2}} = \frac{z_1}{z_2} r_{w2} = r_{w1} \cdot \frac{z_2}{z_1}. \quad (10.14)$$

Подставим параметры из (10.12)...(10.14) в (10.11):

$$2\pi r_{w1} / z_1 = 2r_{w1}(S'_1 / 2r_1 + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{w12}) + 2r_{w1}z_2 / z_1(S'_2 / 2r_2 + \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_{w12})$$

Сократим обе стороны равенства на $2r_{w1}$ и умножим на z_1 . В итоге получим

$$\pi = S'_1/m + z_1 \operatorname{inv} \alpha - z_1 \operatorname{inv} \alpha_{w12} + S'_2/m + z_2 \operatorname{inv} \alpha - z_2 \operatorname{inv} \alpha_{w12}.$$

После преобразования

$$(z_1 + z_2) \operatorname{inv} \alpha_{w12} = (z_1 + z_2) \operatorname{inv} \alpha + S'_1/m + S'_2/m - \pi.$$

Отсюда

$$\operatorname{inv} \alpha_{w12} = \operatorname{inv} \alpha + \frac{S'_1 + S'_2 - \pi m}{m(z_1 + z_2)}. \quad (10.15)$$

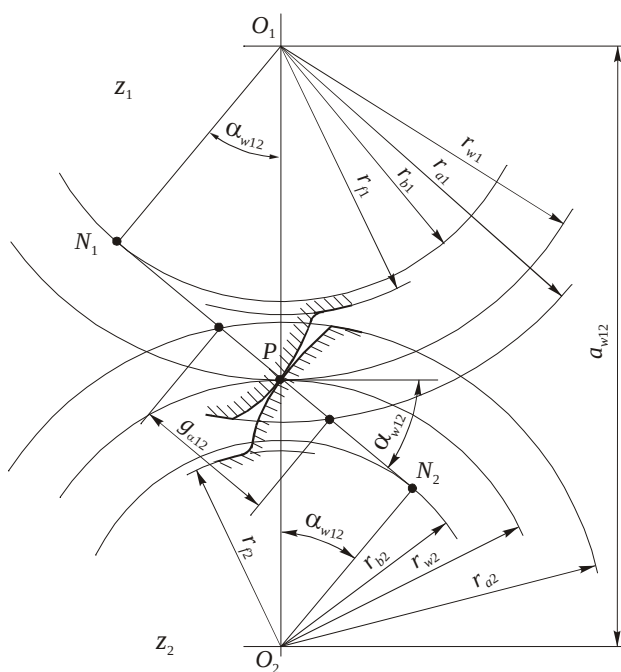


Рис. 10.8. Зацепление корригированных колес

Из этого уравнения следует, что если колесо z_1 находится в зацеплении с инструментами реечного типа (червячная фреза, гребенка), у которых $z_2 = \infty$, то второй член правой части уравнения превращается в нуль и угол зацепления передачи становится равным углу профиля исходного контура рейки, т.е. $\alpha_{w12} = \alpha_0$.

Для инструментов типа колеса (долбяк, шевёр) уравнение (10.15) желательно представить в виде зависимости $\text{inv}\alpha_{w10}$ от величины смещения профиля пары корригированных колес z_1 и z_0 . Для этого подставим в (10.15) значения S'_1 и S'_2 , рассчитанные по формуле (10.9):

$$\text{inv}\alpha_{w10} = \text{inv}\alpha_0 + \frac{\frac{\pi m}{2} + 2x_1 m \text{tg}\alpha_0 + \frac{\pi m}{2} + 2x_0 m \text{tg}\alpha_0 - \pi m}{m(z_1 + z_0)},$$

или после сокращений

$$\text{inv}\alpha_{w10} = \text{inv}\alpha_0 + 2 \frac{x_1 + x_0}{z_1 + z_0} \text{tg}\alpha_0, \quad (10.16)$$

где α_0 – угол профиля инструмента.

Межцентровое расстояние у корригированных колес

$$a_{w12} = r_{w1} + r_{w2}.$$

Так как радиусы начальных окружностей (рис. 10.8) равны

$$r_{w1} = \frac{r_{b1}}{\cos\alpha_{w12}} = \frac{mz_1 \cos\alpha}{2 \cos\alpha_{w12}};$$

$$r_{w2} = \frac{r_{b2}}{\cos\alpha_{w12}} = \frac{mz_2 \cos\alpha}{2 \cos\alpha_{w12}},$$

тогда

$$a_{w12} = \frac{m(z_1 + z_2)}{2} \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_{w12}}. \quad (10.17)$$

Номинальная длина линии зацепления (рис. 10.8):

$$g = N_1 P + N_2 P = r_{w1} \sin\alpha_{w12} + r_{w2} \sin\alpha_{w12} = a_{w12} \sin\alpha_{w12}. \quad (10.18)$$

Длина активной части линии зацепления сопряженных колес равна расстоянию между точками пересечения линии зацепления окружностями выступов шестерни и колеса (рис. 10.8):

$$g_{a12} = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - a_{w12} \sin\alpha_{w12}. \quad (10.19)$$

Радиусы окружностей выступов и впадин у корригированного колеса с учетом смещения $\pm x_0 m$:

$$\begin{cases} r_{a1} = mz_1/2 + h_a^*m \pm x_0m; \\ r_{f1} = mz_1/2 - h_f^*m \mp x_0m. \end{cases} \quad (10.20)$$

При этом высота зуба колеса $h = h_a = h_f$ от величины смещения профиля не зависит. Из-за разности знака у головки и ножки, т.е. $h = h_a^*m \pm x_0m + h_f^*m \mp x_0m = h_a^*m + h_f^*m$, здесь и выше верхний знак используется при положительном смещении, а нижний – при отрицательном смещении профиля.

Возможен частный случай, когда пара «шестерня – колесо» или «колесо – инструмент» имеет одинаковые по величине, но обратные по знаку величины смещения (так называемое нулевое зацепление), тогда делительные окружности совпадают с начальными. Как следует из уравнения (10.16), в этом случае угол зацепления $\alpha_{w12} = \alpha$, но меняются толщина зубьев по делительной окружности и соотношение высот головок и ножек зубьев. В этом случае межцентровое расстояние равно

$$a_{w12} = (d_1 + d_2)/2 = m(z_1 + z_2)/2.$$

Такая коррекция применяется при больших передаточных числах. При ней обычно положительное смещение берется для шестерни с целью увеличения прочности зубьев, т.е. имеет место только высотная коррекция.

При угловой коррекции шестерню и колесо изготавливают обычно с положительным смещением исходного контура. Угол зацепления у таких колес будет больше, чем у некорригированных (отсюда и название – «угловая коррекция»). Основное преимущество угловой коррекции перед высотной состоит в том, что она дает возможность увеличить прочность зубьев как у шестерни, так и у колеса.

Если величина или знаки коррекции у нарезаемых колес не совпадают, то имеет место совмещение угловой и высотной коррекции одновременно.

10.2. Зуборезные инструменты, работающие по методу копирования

К числу этих инструментов относятся: дисковые и пальцевые модульные фрезы, зубодолбежные головки и протяжки. Первые два вида инструментов широко применяются в мелкосерийном и ремонтном производстве. Дисковые модульные фрезы выпускаются серийно инструментальными заводами. Два последних вида инструментов являются

специальными и предназначены для изготовления колес определенного модуля и числа зубьев. Они используются на специальных станках в массовом производстве, очень сложны в изготовлении и имеют ограниченное применение. Подробнее о них см. в [13, 22].

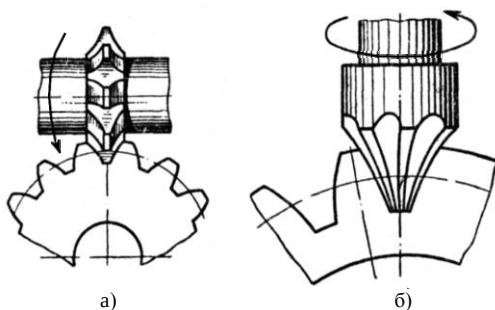


Рис. 10.9. Способы нарезания зубьев колес методом копирования: а – дисковой модульной фрезой; б – пальцевой модульной фрезой

Дисковые зуборезные фрезы представляют собой дисковые фрезы с фасонными режущими кромками. Применяются для нарезания прямозубых и реже косозубых колес ($m = 0,3 \dots 26$ мм) на универсально-фрезерных станках с делительным устройством.

В процессе зубонарезания фреза вращается вокруг своей оси, а движение подачи задается заготовке, установленной в делительном устройстве станка, параллельно ее оси. В начале захода фреза врезается на полную глубину впадины и далее перемещается вдоль нее. Процесс последовательной обработки впадин между зубьями нарезаемого колеса производится путем деления на один окружной шаг. Основным достоинством такого инструмента является простота переточки. Как и все инструменты с затылованными зубьями, дисковые модульные фрезы перетачиваются по передней грани. Процесс зубонарезания ими прост в наладке и кинематике и не требует применения специальных зуборезных станков. Однако такой способ нарезания зубьев является малопроизводительным и обеспечивает низкую точность из-за погрешностей деления и установки фрезы относительно заготовки. Зубья фрезы, как правило, затылованные, имеют далеко не оптимальную геометрию режущих кромок, что приводит к снижению режимов резания и стойкости инструмента.

Число зубьев у фрез с затылованным зубом из-за необходимости иметь большой припуск на переточку мало, что также отрицательно сказывается на производительности и качестве обработанной поверхности. Поэтому данным инструментом нарезаются колеса самой низкой (9-й и 10-й) степени точности.

При нарезании прямозубых колес методом копирования профиль режущих кромок является копией профиля впадины между зубьями ко-

Центральный угол δ_1 для точки 1, лежащей на делительной окружности, будет равен четверти углового шага между зубьями (без учета коррекции и припуска на последующую обработку), т.е.

$$\delta_1 = 2\pi / 4z_1 = \pi / 2z_1. \quad (10.21)$$

Для точки 2 на основной окружности, как следует из уравнения эвольвенты (10.1) и рис. 10.10,

$$\delta_2 = \delta_1 - \text{inv}\alpha = \pi / 2z_1 - \text{inv}\alpha. \quad (10.22)$$

Для любой точки M эвольвенты, лежащей на окружности радиуса r_M , угол

$$\delta_M = \delta_2 + \text{inv}\alpha_M = \pi / 2z_1 - \text{inv}\alpha - \text{inv}\alpha_M. \quad (10.23)$$

В этих уравнениях значения углов δ_1 , δ_2 и δ_M получаются в радианах. Для перевода в градусы их следует умножить на $57,29578^\circ$ или воспользоваться справочными таблицами. В уравнении (10.23) для стандартного зацепления $\alpha = 20^\circ$, а $\cos \alpha_M = r_b / r_M$.

Как следует из рис. 10.10, координаты точки M удобнее задавать в **декартовой системе координат**:

$$\begin{cases} X_M = r_M \sin \delta_M; \\ Y_M = r_M \cos \delta_M. \end{cases} \quad (10.24)$$

При расчете профиля шаблона начало координат переносят из точки O в точку O_1 , лежащую на окружности впадин. При этом пересчитывают значения ординат $Y_{ш}$ точек шаблона:

$$Y_{ш} = Y_M - r_f.$$

Значения абсцисс остаются без изменения, т.е. $X_{ш} = X_M$.

Обычно для построения профиля берут 5...10 точек на профиле плюс три точки выше окружности выступов. Чем больше точек, тем выше точность построения профиля.

У чистовых фрез, предназначенных для нарезания корригированных колес, с учетом величины смещения профиля $x_1 m$ и утонения зуба колеса на делительной окружности ΔS_1 (для создания бокового зазора) величину δ_1 можно определить по уравнению

$$\delta_1 = \frac{e'_1}{2r_1} = \frac{\pi m / 2 - 2x_1 m \text{tg} \alpha - \Delta S_1}{mz_1} = \frac{\pi}{2z_1} - \frac{2x_1 \text{tg} \alpha}{z_1} - \frac{\Delta S_1}{mz_1}, \quad (10.25)$$

где e'_1 – ширина впадины по делительной окружности для корригированных зубьев колеса; x_1 – коэффициент смещения профиля (задается чертежом колеса); ΔS_1 – утонение зуба (берется из справочника в зависимости от модуля).

При построении профиля вершины зуба фрезы, обрабатывающей нерабочий участок зуба колеса, исходят из следующих требований:

1. Необходимо обеспечить радиальный зазор сопрягаемых колес, который должен быть равен не менее $0,25m$.

2. Нельзя допускать интерференцию (наложение) профилей сопрягаемых колес z_1 и z_2 . В этом случае наибольшую опасность представляет сопряжение колеса с рейкой.

Первое требование выполняется путем оформления впадины у основания зуба колеса и, соответственно, вершины зуба фрезы по окружности радиуса (рис. 10.11, а):

$$r' = km, \quad (10.26)$$

где k – коэффициент, зависящий от числа зубьев колеса ($k = 0,25 \dots 0,52$, причем наибольшее значение коэффициента берется для $z_1 = 12$, а наименьшее – для $z_1 = 134$. Абсцисса центра окружности $x_1/2$ находится путем построения профиля, а ордината $y_1 = r'$).

Второе требование обусловлено тем, что интерференция профилей сопряженных колес может привести к заклиниванию передачи, что недопустимо. Поэтому нерабочий участок профиля впадины зуба колеса z_1 должен быть построен по касательной к траектории вершины зуба сопрягаемого колеса z_2 или рейки. Для колеса это удлиненная эпициклоида, для рейки – удлиненная эвольвента. Эти кривые можно построить по уравнениям, приведенным в [22].

Учитывая невысокую точность колес, нарезаемых дисковыми фрезами, построение профиля нерабочего участка упрощают. При этом возможны два варианта, в зависимости от положения основной окружности относительно окружности впадин:

1. Основная окружность лежит ниже окружности впадин, т.е. $r_{b1} < r_{f1}$ (рис. 10.11, а). Для некорригированных колес это имеет место при $z_1 > 34$. В этом случае весь профиль до окружности впадин будет теоретически эвольвентным, ибо эвольвента начинается от основной окружности. Для построения профиля нерабочего участка ниже точки K проводят касательную к окружности впадин колеса и строят сопряжение дуги окружности радиуса r' (по уравнению (10.26)) с этой касательной и эвольвентой.

которых предназначается для изготовления колес с числом зубьев в определенном диапазоне.

Стандартные дисковые фрезы изготавливают комплектами из 8 штук (номеров) для модулей $m \leq 8$ мм и из 15, а иногда из 26 номеров для колес $m > 8$ мм.

В основу комплектования фрез положено равенство отрезков по дуге окружности выступов колес. Для этого вычерчивают в увеличенном масштабе профиль рейки и профили зубьев колес от $z = 12$ и более. Разницу профилей по наружному диаметру делят на 8 примерно равных отрезков и определяют, какому числу зубьев соответствуют номера профилей от 1 до 8 (рис. 10.12). Каждая фреза из комплекта, таким образом, предназначена для нарезания определенного диапазона чисел зубьев. В табл. 10.1 приведены данные об этих диапазонах для номеров фрез в наборе из 8 и 15 фрез.

Из таблицы видно, что чем больше номер фрезы, тем шире диапазон чисел нарезаемых зубьев, а фрезой №8 можно нарезать колеса с $z = 135$ до ∞ , т.е. включая рейку.

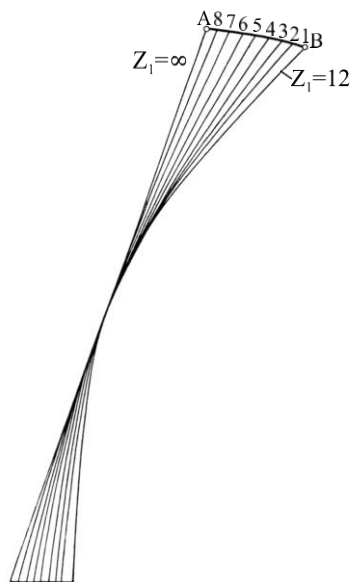


Рис. 10.12. Профили зубьев колес с разным числом зубьев и одного модуля

Таблица 10.1
Зависимость числа нарезаемых зубьев колеса от номера дисковой зуборезной фрезы для комплектов из 8 фрез ($m \leq 8$ мм) и 15 фрез ($m > 8$ мм)

Номер фрезы	Число фрез в комплекте		Номер фрезы	Число фрез в комплекте	
	8	15		8	15
1	12; 13	12	5	26...34	26...29
1 1/2	--	13	5 1/2	--	30...34
2	14...16	14	6	35...54	35...41
2 1/2	--	15; 16	6 1/2	--	42...54
3	17...20	17; 18	7	55...134	55...79
3 1/2	--	19; 20	7 1/2	--	80...134
4	21...25	21; 22	8	135	135...∞
4 1/2	--	23...25			

С увеличением модуля увеличивается высота зубьев, а разница в кривизне профилей становится большей. Поэтому предусматриваются более узкие диапазоны чисел нарезаемых зубьев и большее число фрез в комплекте. Промежуточные номера при этом обозначаются дробными числами, например $3\frac{1}{2}$ (для комплекта из 15 фрез) или $5\frac{1}{4}$ (для комплекта из 26 фрез). Следует иметь в виду, что фреза каждого номера профилируется по наименьшему числу зубьев диапазона. В этом случае уменьшается опасность защемления зубьев сопряженных колес, так как радиус кривизны профиля будет тем меньше, а соответственно, ширина прорезаемой впадины тем больше, чем меньше число зубьев нарезаемого колеса.

Особенности конструкции и геометрические параметры дисковых зуборезных фрез. Основные размеры фрез выбираются так же, как и для обычных дисковых фасонных фрез. Для стандартных фрез наружный d_{a0} и посадочный $d_{отв}$ диаметры определяют по эмпирическим уравнениям:

$$d_{a0} = 43,5m^{0,5}; \quad d_{отв} = 1,06 d_a^{0,72}.$$

Для упрощения изготовления и переточки зубья фрез затылуют по архимедовой спирали. Величина падения затылка по вершине зуба определяется по известному уравнению

$$k_z = \frac{2\pi r_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_{\varepsilon},$$

где r_{a0} – радиус наружной окружности фрезы; z_0 – число зубьев фрезы; α_{ε} – задний угол на вершине зуба.

Задние углы на боковых режущих зубьях в нормальном сечении (рис. 10.13):

$$\operatorname{tg} \alpha_{Ni} = \frac{r_{a0}}{r_i} \operatorname{tg} \alpha_{\varepsilon} \sin \varphi_i, \quad (10.27)$$

где r_i – радиус любой i -й точки режущей кромки; φ_i – угол между касательной к профилю и перпендикуляром к оси фрезы ($\varphi_i = 10 \dots 16^\circ$).

Из уравнения (10.27) и рис. 10.13 следует, что величина α_{Ni} переменная. Она уменьшается в точках боковых режущих кромок около вершины до $1^\circ 30'$ даже при $\alpha_{\varepsilon} = 12 \dots 15^\circ$.

Передний угол у стандартных фрез равен нулю, что ухудшает условия резания, но упрощает изготовление, переточку и контроль профиля зубьев фрез.

При нарезании колес крупных модулей удаление больших объемов металла из впадин занимает много времени. С целью повышения производительности для предварительного (чернового) фрезерования используют фрезы со вставными ножами, часто оснащенными напайными твердосплавными пластинами. В этом случае профиль зубьев можно брать упрощенный – прямоугольный или трапецевидный.

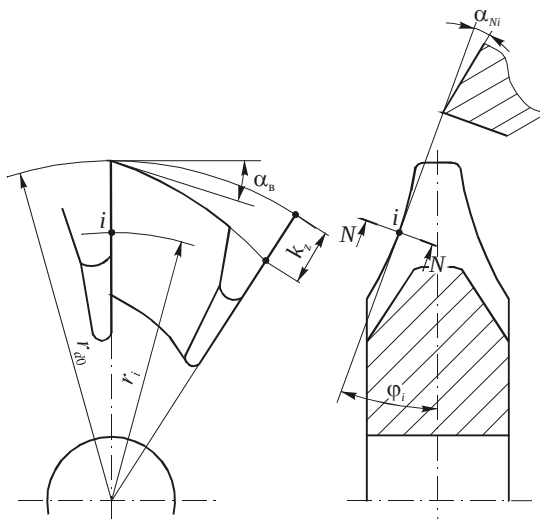


Рис. 10.13. Определение заднего угла на боковых режущих кромках в нормальном сечении

Зубья лучше выполнять не затылованными, а остроконечными с заточкой по передней и задней граням. Это дает возможность увеличить значения задних углов до оптимальных величин, увеличить число зубьев, а следовательно, повысить стойкость и производительность фрез. Передние углы берут положительными (до $\gamma = 10...15^\circ$), что облегчает процесс резания.

С этой же целью используют наборы из 2...4 фрез, насаживаемых на одну оправку (рис. 10.14).

В этом случае каждая фреза удаляет определенную часть металла из впадины между зубьями колеса. После прохода набора фрез колесо поворачивается на один зуб с помощью делительного устройства. Таким образом, предварительное нарезание зубьев производится методом бес-

центрального огибания с делением припуска между фрезами в наборе. Окончательно профиль впадины формируется чистовой фрезой, припуск на которую благодаря такой схеме резания снижается. Это способствует повышению точности нарезаемых колес и стойкости фрез.

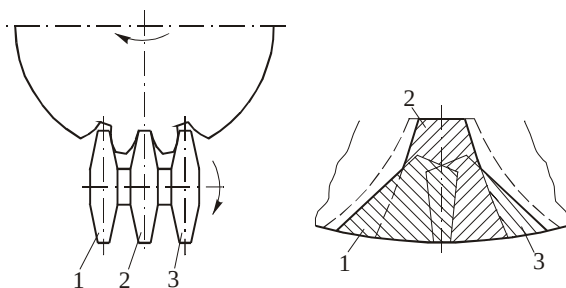


Рис. 10.14. Набор из трех дисковых фрез для чернового нарезания зубчатых колес

Пальцевые зуборезные фрезы. Это концевые фрезы с фасонным профилем режущих кромок. Применяются в тяжелом машиностроении для нарезания крупномодульных колес ($m = 10 \dots 100$ мм) с прямыми, косыми и шевронными зубьями.

В отличие от дисковых фрез, пальцевые фрезы (рис. 10.15) крепятся консольно с помощью резьбы, с базированием по точно выполненному цилиндрическому пояску на посадочной части шпинделя станка.

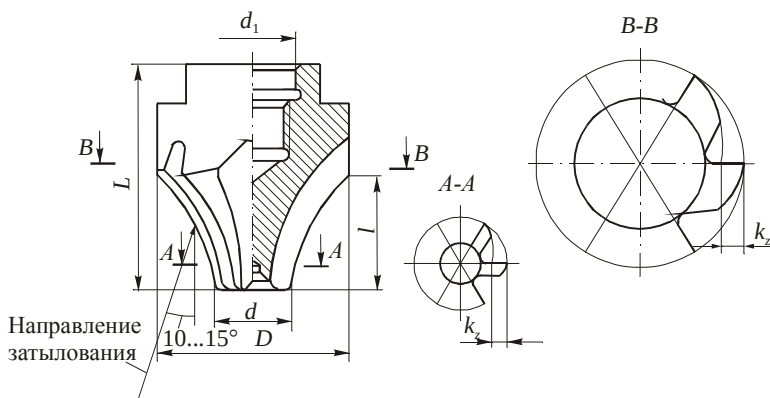


Рис. 10.15. Пальцевая зуборезная фреза

В процессе работы ось фрезы, совпадающая с осью шпинделя, совмещена с линией симметрии впадины между зубьями нарезаемого колеса. Фреза, вращаясь, перемещается вдоль зуба колеса. При этом движение подачи задается либо фрезе, либо заготовке.

По сравнению с дисковыми фрезами, пальцевые фрезы имеют значительно меньшие габаритные размеры. Диаметральные размеры их рабочей части определяются размерами впадины между зубьями колеса. Обычно фрезы изготавливаются диаметром от 40 до 220 мм с четным числом зубьев от 2 до 8.

Чаще всего зубья затылуют. Причем из трех возможных способов затылования: радиального, осевого и наклонного – наилучшие результаты дает наклонное затылование под углом $10...15^\circ$ к оси фрезы. При этом задний угол по длине режущих кромок примерно постоянный и, что наиболее важно, изменение диаметра при переточке по передней поверхности зубьев весьма незначительно, а следовательно, мало и искажение профиля нарезаемых впадин колеса после переточки фрезы.

Передние углы у чистовых пальцевых фрез принимаются равными нулю для упрощения изготовления, переточки и контроля профиля.

У черновых фрез с целью снижения сил резания затачивают положительный передний угол (до 8°). Профиль режущих кромок делают прямолинейным, а для деления стружки по ширине выполняют стружкоделительные канавки, расположенные на соседних зубьях в шахматном порядке. С целью экономии инструментальных материалов зубья у фрез с $t > 50$ мм делают с приваренными сваркой режущими пластинами. Для получения оптимальных задних углов зубья фрез изготавливаются остроконечными, а не затылованными.

У чистовых пальцевых фрез для нарезания прямозубых колес методом копирования профиль режущих кромок определяется по той же методике, что и для дисковых фрез, т.е. он совпадает с профилем впадины между зубьями колеса. При нарезании же косозубых колес такого совпадения нет ни в одной из плоскостей сечения. Точки контакта зубьев фрезы с заготовкой лежат на боковых винтовых поверхностях зубьев в разных плоскостях. При этом профиль нарезаемого зуба получается как огибающая различных положений профиля фрезы. Задача профилирования режущих кромок в этом случае решается путем сложных графоаналитических вычислений по методике, изложенной в [21].

Существенными недостатками пальцевых фрез являются низкая производительность и малая точность нарезаемых колес.

Низкая производительность обусловлена самим способом нарезания: малым числом зубьев, нежестким консольным креплением, боль-

шими усилиями резания из-за большой ширины срезаемого слоя и большого угла контакта с заготовкой, вследствие чего приходится снижать подачу и скорость резания.

Низкая точность нарезаемых колес определяется погрешностями профиля фрезы при переточке, погрешностями установки во впадине и погрешностями механизма деления.

Достоинством пальцевых фрез является возможность использования их на универсальных фрезерных станках при нарезании колес очень больших модулей, а в случае нарезания шевронных колес без канавки для выхода инструмента в месте изменения наклона зубьев, они являются единственно возможным зуборезным инструментом.

Пальцевые фрезы являются специальным инструментом и серийно не изготавливаются.

10.3. Червячные зуборезные фрезы

Червячные зуборезные фрезы – это многолезвийные инструменты реечного типа, работающие по методу обката. Они изготавливаются на базе червяка, в котором для образования зубьев прорезаны стружечные канавки. При пересечении с витками червяка они образуют переднюю поверхность в виде рейки. Задние углы на зубьях создаются, как правило, затылованием, что облегчает переточку фрезы в процессе эксплуатации. Так как рейки находятся на витках червяка, то при вращении последнего режущие кромки зубьев получают не только движение вокруг оси фрезы, но и непрерывное смещение вдоль ее оси. Таким образом, червячная фреза является инструментом с конструктивным движением обката или инструментом с бесконечной рейкой, находящейся в зацеплении с нарезаемым колесом.

Способ фрезерования зубчатых колес имеет широкое распространение в промышленности благодаря своей универсальности, высокой производительности и точности. Одной и той же фрезой данного модуля можно нарезать колеса с различным числом зубьев, что значительно сокращает число типоразмеров фрез. Благодаря непрерывности процесса обката достигаются высокая производительность и точность колес по шагу. Обработка ведется на специальных зубофрезерных станках, обеспечивающих вращение фрезы и заготовки вокруг своих осей и движение подачи фрезы вдоль оси нарезаемого колеса.

По точности червячные фрезы изготавливаются классов ААА и АА (прецизионные) А, В, С и Д (общего назначения) и предназначены для нарезания колес 5...9-й степеней точности.

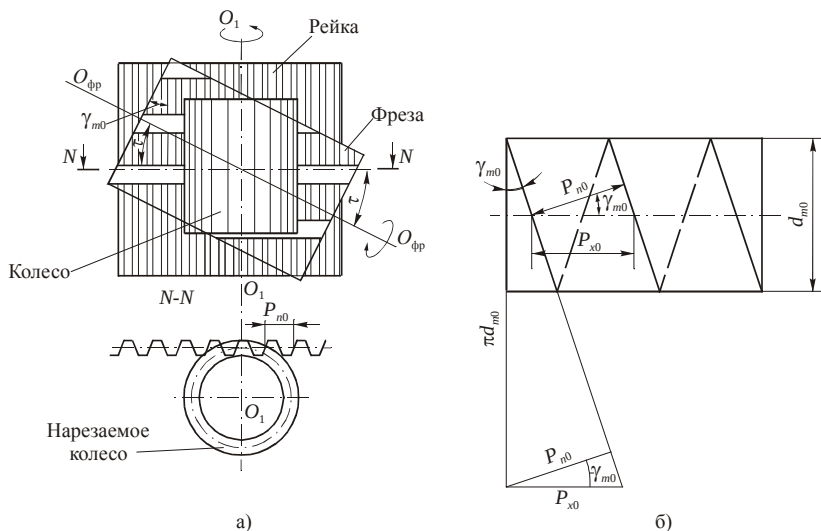


Рис. 10.16. Схема зубонарезания червячной фрезой: а – зацепление колеса и фрезы с рейкой; б – развертка витка фрезы на делительном цилиндре

Кроме того, фрезы подразделяются: а) по числу заходов червяка – на одно – и многозаходные; б) по направлению витков – правые (для нарезания прямозубых и правозаходных колес) и левые (для нарезания одноименных косозубых колес); в) по способу крепления – насадные и хвостовые (для червячных колес); г) по конструкции – цельные и сборные; д) по технологии изготовления – с нешлифованными и со шлифованными поверхностями зубьев.

Принцип работы червячных фрез. Процесс зубонарезания червячной фрезой подобен процессу зацепления двух зубчатых колес. При этом червяк можно рассматривать как колесо с винтовыми зубьями, число которых равно числу заходов. Оси червяка и колеса скрещиваются в пространстве (рис. 10.16, а).

В процессе зубонарезания фреза и колесо вращаются вокруг своих осей, а движение подачи вдоль оси колеса осуществляется перемещением суппорта станка. Причем с самого начала зубья фрезы врезаются на полную глубину впадины между зубьями колеса. Вращение колеса и фрезы строго скоординированы с движением подачи. За один оборот фрезы колесо поворачивается вокруг оси на a/z_1 оборота, где a – число заходов фрезы; z_1 – число зубьев нарезаемого колеса. Все зубья одноза-

ходной фрезы участвуют в формировании профиля впадины зубьев колеса, которые получаются как огибающая различных положений зубьев фрезы. При работе многозаходных фрез за один оборот фрезы одновременно обрабатывается число впадин, равное числу заходов.

Известно, что при фрезеровании инструмент с заготовкой имеет прерывистый контакт, поэтому при зубонарезании это приводит к появлению на боковых поверхностях зубьев колеса огранки ($f_{огр}$), а по дну впадины – волнистости ($f_{волн}$), (рис. 10.17). Хотя эти отклонения от теоретически точного профиля малы, тем не менее они сказываются на плавности при работе зубчатой передачи. Поэтому при изготовлении точных колес необходимы дополнительные операции, такие как шевингование, зубошлифование.

Величины огранки и волнистости могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [12, 22], из которых следует, что они возрастают с увеличением числа заходов фрезы и продольной подачи.

Из теории зацепления известно, что для правильного зацепления двух колес с разным направлением зубьев необходимо, чтобы каждое из них правильно сцеплялось с одной и той же рейкой. Это возможно только при равенстве шагов, угла профиля и модуля в сечении, нормальном к направлению витков на среднем (делительном) цилиндре фрезы и рейки, т.е. должно быть: $P_{n0} = P_1$, $\alpha_0 = \alpha_1$, $m_{n0} = m_1$.

Кроме того, в теории эвольвентного зацепления доказывается, что если одно из колес передачи имеет эвольвентный профиль, то и сопряженное колесо должно быть также эвольвентным.

Рассмотрим, как выполняются эти требования при проектировании червячных фрез.

Как следует из рис. 10.17, а, для того чтобы витки фрезы и зубья нарезаемого колеса касались одной и той же пространственной рейки, ось фрезы $O_{фр}$ должна быть установлена под углом $\tau = \gamma_{m0}$ к нормальному сечению рейки, а, следовательно, и к торцу колеса, если оно прямоугольное (здесь γ_{m0} – угол подъема витков червяка на делительном цилиндре диаметром d_{m0}).

Из развертки винтовой линии витка на этом цилиндре (рис. 10.16, б) следует, что

$$\operatorname{tg} \gamma_{m0} = P_{x0} / \pi d_{m0}, \quad (10.28)$$

осевой шаг

$$P_{x0} = P_{n0} / \cos \gamma_{m0}. \quad (10.29)$$

Для исходного контура зубчатой рейки принято, что нормальный шаг $P_{n0} = \pi m$. Следовательно,

$$\operatorname{tg} \gamma_{m0} = \frac{P_{n0}}{\pi d_{m0} \cos \gamma_{m0}} = \frac{\pi m}{\pi d_{m0} \cos \gamma_{m0}}; \quad \sin \gamma_{m0} = \frac{m}{d_{m0}}. \quad (10.30)$$

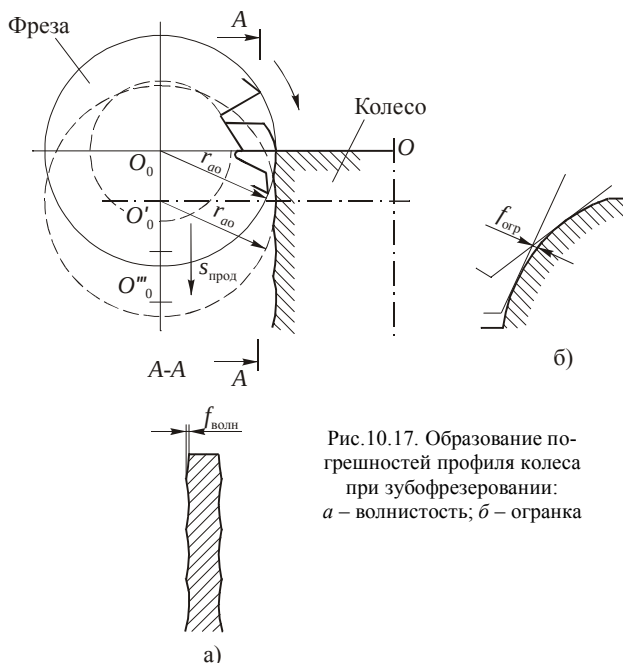


Рис. 10.17. Образование погрешностей профиля колеса при зубофрезеровании:
а – волнистость; б – огранка

Исходя из второго требования теории зацепления, теоретически точная червячная зуборезная фреза должна быть изготовлена на базе исходного эвольвентного червяка. Однако на практике это создает большие затруднения, как при изготовлении самого червяка, так и при затыловании зубьев и контроле их профиля. Дело в том, что профиль зубьев эвольвентного червяка в осевом сечении, в котором осуществляется радиальное затылование, имеет криволинейную форму. Из-за этого невозможно обеспечить его постоянство при переточках фрезы. Для осевого же затылования боковых поверхностей зубьев необходимы специальные станки, которые, однако, не могут обеспечить одновременно затылование зубьев по вершинным и боковым режущим кромкам. Невозможно также обеспечить точный контроль профиля зубьев из-за отсутствия необходимых приборов.

Поэтому на практике червячные фрезы проектируют и изготавливают на базе архимедовых и конволютных червяков, максимально приближенных к эвольвентному червяку и лишенных указанных недостатков.

Типы и свойства винтовых поверхностей червяков, применяемых для изготовления фрез. В основе боковых поверхностей витков указанных выше червяков лежат линейчатые винтовые поверхности, т.е. поверхности, образованные винтовым движением отрезка прямой относительно оси вращения.

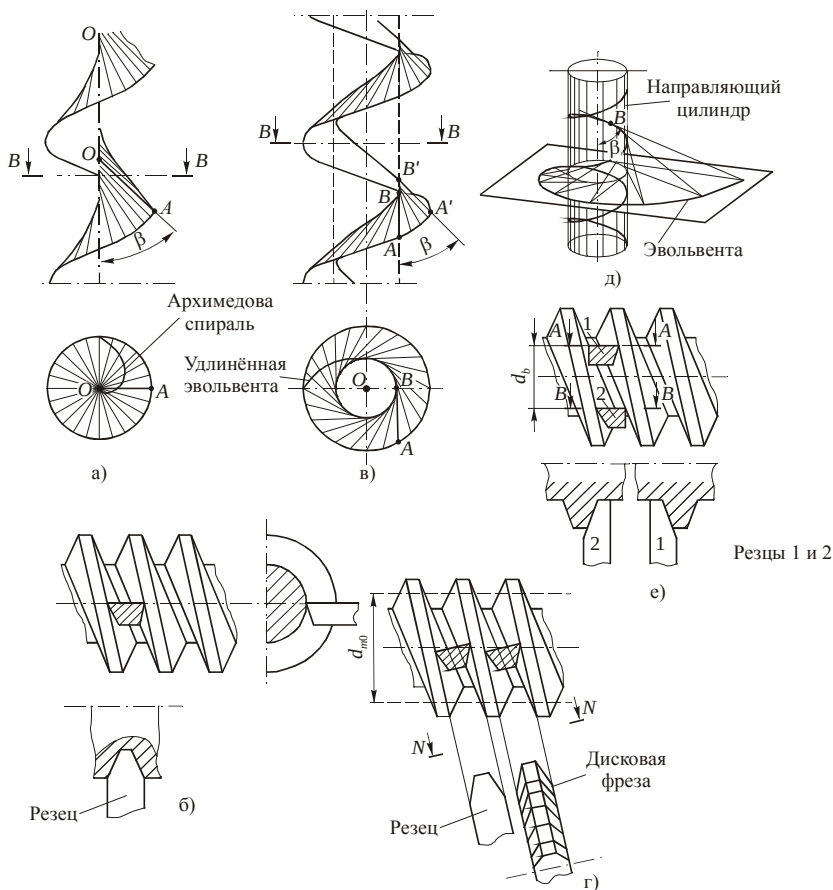


Рис. 10.18. Типы винтовых поверхностей и способы изготовления червяков: а – архимедова винтовая поверхность; б – способ изготовления архимедова червяка; в – конволютная винтовая поверхность; г – способы изготовления конволютного червяка; д – эвольвентная винтовая поверхность; е – способ изготовления эвольвентного червяка

Архимедова винтовая поверхность образуется отрезком прямой, пересекающей с осью под углом β (рис. 10.18, а). В частном случае при $\beta = 90^\circ$ образуется поверхность коноида, примером которого является винт с прямоугольной резьбой или передняя поверхность зубьев червячной фрезы, образуемая при фрезеровании стружечных канавок с передним углом $\gamma = 0^\circ$.

В осевом сечении архимедовой винтовой поверхности находится прямая – образующая этой поверхности, а в сечении, перпендикулярном к оси, – архимедова спираль.

Архимедов червяк, используемый для изготовления зуборезных фрез, представляет собой резьбовое изделие с трапециевидной резьбой, которая может быть образована резцом с передней гранью, установленной в осевой плоскости, т.е. проходящей через линию центров (рис. 10.18, б).

В этой же плоскости производится радиальное затылование зубьев фрезы резцами с прямолинейными режущими кромками, а также контроль профиля с высокой точностью специальными приборами.

Другим примером использования архимедовой винтовой поверхности является поверхность витков метрической резьбы с углом образующей к оси, равным $\beta = 60^\circ$.

Как показал анализ, при замене эвольвентного червяка архимедовым достигается наименьшая погрешность профиля нарезаемых колес по сравнению с конволютным червяком [22]. Поэтому чистовые червячные фрезы изготавливаются на базе архимедовых червяков.

Конволютная винтовая поверхность образуется отрезком прямой, которая, совершая винтовое движение относительно оси, все время остается касательной к некоему цилиндру, называемому направляющим цилиндром (рис. 10.18, в).

В сечении этой поверхности плоскостью, касательной к направляющему цилиндру, лежит прямая – образующая, а в сечении, перпендикулярном к оси, – удлиненная эвольвента. Из множества конволютных червяков для изготовления червячных фрез берут такой червяк, который в сечении, перпендикулярном к виткам, дает прямолинейный профиль, подобный профилю исходного контура рейки. Такой червяк можно нарезать резцом, устанавливаемым в плоскости $N - N$, или дисковой фрезой с прямолинейными режущими кромками, ось которой параллельна плоскости $N - N$ (рис. 10.18, г). Контроль профиля зубьев у таких фрез производится также в этой плоскости с помощью шаблона на просвет, что из-за наличия субъективного фактора снижает точность измерения. Так как при замене эвольвентного червяка конволютным

также возникают погрешности, причем большие, чем при замене архимедовым червяком, то на базе конволютных червяков изготавливают черновые и получистовые червячные фрезы. В то же время использование дисковых фрез при изготовлении таких червяков значительно снижает трудоемкость нарезания витков.

Эвольвентная винтовая поверхность является частным случаем конволютной винтовой поверхности, когда образующая прямая касательна не только к направляющему цилиндру, но и к винтовой линии на нем, образованной винтовым перемещением точки контакта образующей и цилиндра (рис. 10.18, *д*). В качестве направляющего цилиндра принимается основной цилиндр. В сечении этой поверхности плоскостью, перпендикулярной к оси, лежит эвольвента, а в сечении плоскостью, касательной к цилиндру, – прямая.

Особенностью эвольвентной винтовой поверхности является то, что это единственная из линейчатых винтовых поверхностей, развертывающаяся на плоскости, т.е. ее можно обрабатывать плоскостью инструмента, например плоскостью шлифовального круга. Другие линейчатые поверхности – неразвертывающиеся, поэтому их можно получать только инструментом с прямолинейной режущей кромкой.

Теоретически изготовление точного эвольвентного червяка также возможно, если два резца с прямолинейными режущими кромками, наклонными к оси, будут расположены выше (для левой стороны витка) и ниже (для правой) оси центров на расстоянии, равном радиусу основного цилиндра (рис. 10.18, *е*). В этих плоскостях режущие кромки совпадают с образующими левой и правой винтовых поверхностей червяка. Однако при таком расположении резцов условия резания неблагоприятны из-за появления вибраций. Поэтому на практике эвольвентные червяки получают из конволютных, у которых витки образуются фрезерованием дисковыми фрезами с последующей шлифовкой по боковым сторонам профиля плоской стороной шлифовального круга. Контроль профиля червяков производится наложением лекальной линейки под углом β к оси. При этом линейка должна совпадать без просвета с контролируемым профилем, а плоскость линейки должна быть касательна к основному цилиндру. Точность такого измерения, однако, невысока из-за влияния субъективного фактора.

Приближенные методы профилирования червячных фрез. При замене исходного эвольвентного червяка архимедовым или конволютным приходится решать задачу профилирования, т.е. определения угла профиля червяка α_r , заменяющего эвольвентный червяк. При этом

стремятся к тому, чтобы неизбежно возникающая при такой замене погрешность была минимальной.

На практике применяют два приближенных способа профилирования червячных фрез для нарезания цилиндрических колес.

1. Профиль фрезы прямолинейный в осевом сечении. В этом случае эвольвентный червяк заменяется архимедовым. Доказано [22], что в осевом сечении эвольвентного червяка профиль боковой стороны витка криволинейный. В системе координат XOY , где ось X совпадает с осью фрезы, уравнение этой кривой (рис. 10.19, а) имеет вид

$$X = \pm \frac{P_x}{2\pi} \left[\sqrt{\frac{y^2}{r_b^2} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{y^2}{r_b^2} - 1} \right], \quad (10.31)$$

где P_x – осевой шаг червяка; P – винтовой параметр ($P = P_x / 2\pi$); r_b – радиус основного цилиндра.

Выражение в скобках – уравнение эвольвенты (см. разд. 10.1). Знак «+» соответствует левой, а знак «–» – правой сторонам витка червяка.

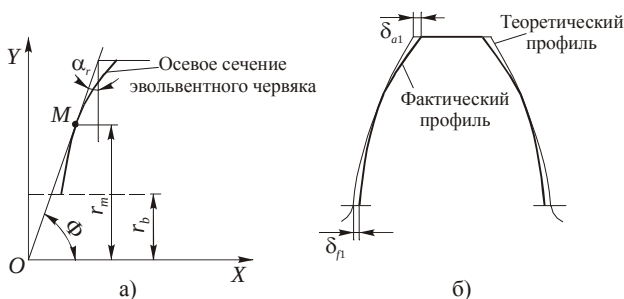


Рис. 10.19. Схема определения: а – угла профиля α , архимедова червяка;

б – погрешности δ_{a1} и δ_{f1} профиля зуба колеса

Для определения угла профиля архимедова червяка, заменяющего эвольвентный, проведем касательную к кривой осевого сечения последнего в некоторой точке M , лежащей на делительном цилиндре радиусом r_m , и найдем $\operatorname{tg} \Phi$ наклона ее к оси X как производную функции (10.31), т.е.

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{dY}{dX} = \frac{1}{\frac{dX}{dY}} = \frac{Y r_b}{P \sqrt{Y^2 - r_b^2}}. \quad (10.32)$$

Подставим в уравнение (10.32) вместо Y ординату точки касания – r_m , тогда

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{r_m r_b}{P \sqrt{r_m^2 - r_b^2}}. \quad (10.33)$$

Произведем замены в уравнении (10.33), подставив из формулы (10.30) значение радиуса основного цилиндра:

$$r_m = m / 2 \sin \gamma_{m0},$$

а из условия зацепления рейки с эвольвентным червяком [22]

$$r_b = m / 2 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_0 + \sin^2 \gamma_{m0}},$$

где α_0 – угол профиля исходного контура рейки.

После преобразования уравнения (10.33) получим в окончательном виде

$$\operatorname{tg} \Phi = \cos \gamma_{m0} / \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (10.34)$$

Так как касательную к кривой сечения эвольвентного червяка можно представить как образующую архимедова червяка, то угол профиля последнего $\alpha_r = 90^\circ - \Phi$, следовательно, его значение будет равно

$$\operatorname{ctg} \alpha_r = \operatorname{tg} \Phi = \operatorname{ctg} \alpha_0 \cdot \cos \gamma_{m0}. \quad (10.35)$$

Как видно из рис. 10.19, *а*, при такой замене будет иметь место утолщение зуба фрезы по головке и ножке и, соответственно, у зуба колеса будет срез по головке δ_{a1} и подрез ножки δ_{f1} (рис. 10.19, *б*). Величины этих отклонений весьма малы и зависят от γ_{m0} и модуля. Так, например, для модуля $m = 8,0$ мм и $\gamma_{m0} = 6^\circ$ они равны 11 мкм. Профиль зуба получается более выпуклым, что благоприятно сказывается на плавности работы зацепления.

При сохранении равенства толщины зуба на делительном цилиндре у обоих типов червяков при таком методе профилирования погрешности фрезы и зуба колеса уменьшаются, так как они делятся на погрешность по головке и ножке зуба.

2. Профиль фрезы прямолинейный в сечении, нормальном к виткам. В этом случае эвольвентный червяк заменяется конволютным. Как показал анализ [22], наименьшую погрешность дает конволютный червяк с прямолинейным профилем в сечении, нормальном к винтовой линии, лежащей на делительном цилиндре и проходящей через середину впадины (рис. 10.18, *з*).

При этом способе профилирования возможны два варианта:

а) угол профиля червяка принимается равным углу профиля исходного контура, т.е. $\alpha_r = \alpha_0$;

б) угол профиля $\alpha_r = \alpha_0 \pm \Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ – поправка на угол профиля, зависящая от угла γ_{m0} [13, 22].

Первый вариант принимается для фрез с γ_{m0} до 3° . При больших γ_{m0} отклонения фактического профиля от теоретически точного профиля увеличиваются. Они выражаются в изменении степени подреза ножки и среза головки зуба нарезаемого колеса.

Введение поправок на угол профиля червяка позволяет уменьшить эти отклонения. Были предложены фрезы как с уменьшенным, так и с увеличенным углом профиля червяка относительно угла профиля исходного контура. В обоих случаях величина погрешности профиля увеличивается с увеличением модуля и угла подъема витков червяка γ_{m0} . Однако абсолютные величины этих погрешностей небольшие. Так, с введением поправок при $m = 10$ мм погрешности не превышают 16...22 мкм.

В целом же способ профилирования на базе конволютного червяка уступает по точности первому способу и используется при проектировании менее точных фрез. При изготовлении черновых фрез указанные поправки могут не учитываться, так как они перекрываются допускаемыми погрешностями нарезаемых колес.

Стружечные канавки фрезы. После нарезания витков червяка следующим этапом в изготовлении фрезы является фрезерование стружечных канавок, которые образуют переднюю поверхность зубьев и пространство для размещения стружки. Их ширина также должна быть достаточной для помещения затылующего резца.

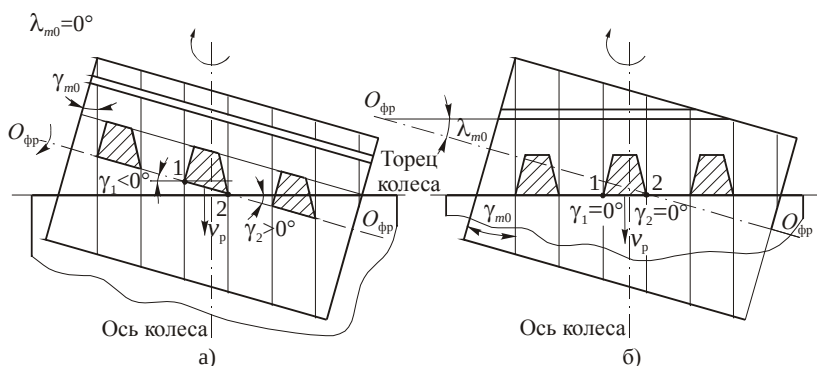


Рис. 10.20. Передние углы на боковых режущих кромках зубьев фрезы: а – стружечные канавки прямые; б – стружечные канавки винтовые

Канавки могут быть прямыми, параллельными оси червяка (рис. 10.20, а) или винтовыми, перпендикулярными направлению витков червяка (рис. 10.20, б). Фрезы с прямыми канавками проще в изготовлении и при переточке затылованных зубьев. Они также более предпочтительны при конструировании сборных фрез. Их недостаток – появление отрицательных передних углов на одной из боковых режущих кромок. Как видно из рис. 10.20, а, у правозаходной фрезы передние углы, измеряемые между нормалью к вектору скорости резания V_p и передней поверхностью зуба, будут положительными на правой и отрицательными на левой кромке и равными по абсолютной величине углу подъема витков фрезы, т.е. $\gamma_1 = -\gamma_{m0}$; $\gamma_2 = +\gamma_{m0}$. Из-за разности условий резания этот вариант используется у фрез с небольшими углами $\gamma_{m0} \leq 6^\circ$. Однако с точки зрения равномерности процесса фрезерования вариант с прямыми канавками более предпочтителен, так как зубья фрезы вступают в контакт с заготовкой последовательно, а не одновременно, как у фрез с винтовыми канавками.

Стандартные фрезы изготавливают с винтовыми канавками. Передние углы при этом варианте одинаковы на обеих боковых режущих кромках и равны нулю, если на вершинной кромке $\gamma_v = 0^\circ$.

При настройке станка на нарезку винтовых стружечных канавок необходимо знать их шаг T вдоль оси фрезы.

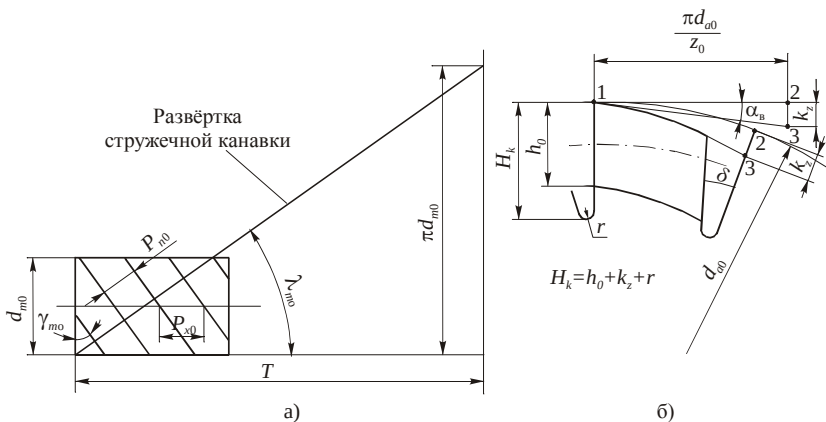


Рис. 10.21. Схема расчета некоторых параметров червячной фрезы: а – развёртка винтовой стружечной канавки фрезы; б – форма канавки и зуба фрезы

На рис. 10.21, а представлена развёртка винтовой линии стружечной канавки на делительном цилиндре фрезы, из которой следует, что

$$T = \pi d_{m0} / \operatorname{tg} \lambda_{m0}, \quad (10.36)$$

где λ_{m0} – угол наклона канавки к оси на делительном цилиндре.

Так как из уравнения (10.28)

$$\pi d_{m0} = P_{x0} / \operatorname{tg} \gamma_{m0}, \text{ то } T = P_{x0} / \operatorname{tg} \gamma_{m0} \operatorname{tg} \lambda_{m0}.$$

Выразим P_{x0} через нормальный шаг P_{n0} по уравнению (10.29), тогда

$$T = \pi m / \sin \gamma_{m0} \operatorname{tg} \lambda_{m0}.$$

При малых значениях $\gamma_{m0} \leq 6^\circ$ $\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$ можно принять $\sin \gamma_{m0} \approx \operatorname{tg} \lambda_{m0}$ из-за их малых величин. Тогда

$$T = \pi m / \sin^2 \gamma_{m0}. \quad (10.37)$$

При больших значениях γ_{m0} , например у многозаходных фрез, рекомендуется брать $\lambda_{m0} = 0,5\gamma_{m0}$.

Форма и глубина канавки, а также форма затылованного по вершине зуба показаны на рис. 10.21, б. Угол между зубьями $\delta = 20 \dots 30^\circ$, а радиус закругления у основания зуба во избежание термических трещин должен быть равен $r = 1 \dots 3$ мм. Величина падения затылка по вершинной режущей кромке при радиальном перемещении затылюющего резца определяется в торцевом сечении по уравнению для фрез с затылованным зубом

$$k_z = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_{в0}, \quad (10.38)$$

где d_{a0} – наружный диаметр фрезы; z_0 – число зубьев в торцевом сечении (равно числу канавок $z_0 = z_k$).

По ГОСТ 9324–80 (в ред. 1992 г.) число зубьев (стружечных канавок) z_0 рекомендуется брать в зависимости от модуля и типа фрезы. Так, например, для $m = 1 \dots 25$ $z_0 = 8 \dots 16$.

Затылование зубьев червячных фрез. После нарезания зубьев фрезы производится их затылование для создания задних углов на режущих кромках. Оно осуществляется резцами или гребенками ($m \leq 5$) и шлифовальными кругами после термообработки фрез.

Затылование по вершинам зубьев и дну впадины между зубьями производится резцами с режущей кромкой, параллельной оси, аналогично радиальному затылованию дисковых фасонных фрез от кулачка с величиной падения затылка k_z по уравнению (10.38).

Наибольшую сложность представляет затылование боковых задних поверхностей зубьев фрезы. Рассмотрим особенности этого затылования и найдем уравнение полученных поверхностей на примере архимедовой червячной фрезы с правым направлением витков.

В процессе затылования резец с прямолинейной режущей кромкой, наклонной к оси, устанавливается в осевой плоскости и совершает два движения: радиальное от кулачка и осевое от ходового винта станка. При этом, как видно из рис. 10.22, за время поворота фрезы вокруг оси на один оборот резец перемещается в радиальном направлении на величину K_p . Одновременно его режущая кромка смещается вдоль оси на величину

$$\Delta P_x = A_1 A'_2 = K_p \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (10.39)$$

где α_0 – угол профиля червяка в осевом сечении; $K_p = k_{zz0}$ – сумма радиальных смещений резца на одном витке фрезы.

Это **дополнительное** осевое перемещение ΔP_x алгебраически складывается с **основным** осевым перемещением от ходового винта P_x , а образуемые поверхности являются винтовыми архимедовыми с шагами $P_x \pm \Delta P_x$, так как режущая кромка затылующего резца при ее продолжении пересекается с осью вращения фрезы. Знак «+» будет при совпадении, а знак «–» – при несовпадении направлений дополнительного и основного перемещений резца вдоль оси при затыловании. Для правозаходной фрезы при затыловании у левой боковой поверхности будет знак «–», а у правой боковой поверхности – знак «+», у левозаходной – знаки обратные.

Затылованные поверхности фрезы не совпадают с поверхностями основного червяка, а профиль зуба в осевом сечении у фрез с винтовыми стружечными канавками будет несимметричным, т.е. для левой и правой сторон углы профиля разные и не будут равны углу профиля червяка: $\alpha_{лев} \neq \alpha_{пр} \neq \alpha_0$.

При этом для правозаходной фрезы шаги затылованных поверхностей равны

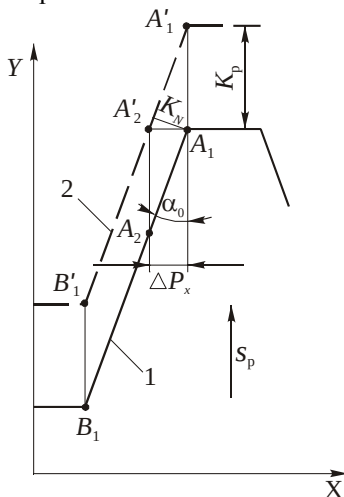


Рис. 10.22. Смещение контура витка фрезы при затыловании: 1 – начальный контур; 2 – конечный контур

$$P_{x\text{лев}} = P_x - \Delta P_x = P_x - K_p \operatorname{tg} \alpha_{\text{лев}};$$

$$P_{x\text{прав}} = P_x + \Delta P_x = P_x + K_p \operatorname{tg} \alpha_{\text{прав}}.$$

У левозаходных фрез знаки перед ΔP_x будут обратными.

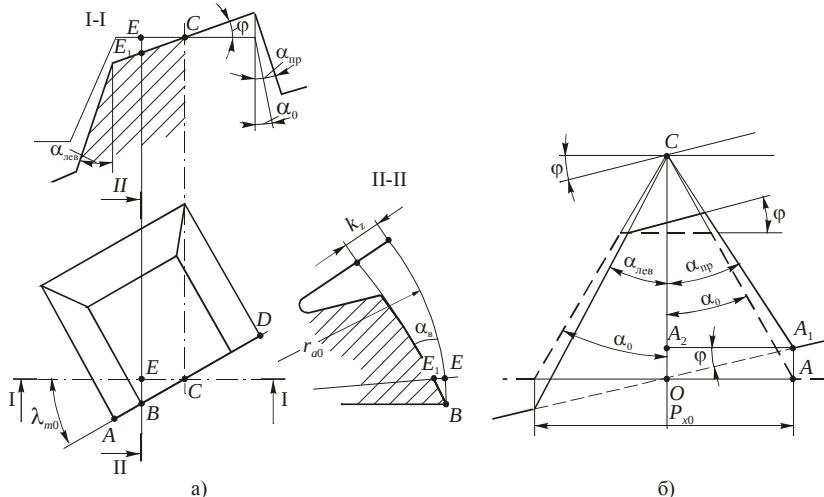


Рис. 10.23. Схема образования профиля червячной фрезы с винтовыми стружечными канавками после затылования

Далее найдем значения $\alpha_{\text{лев}}$ и $\alpha_{\text{прав}}$. В этой связи на рис. 10.24, *a* представлена схема затылования одного зуба правозаходной фрезы с левозаходными стружечными канавками. Так как затылюющий резец устанавливается в осевой плоскости, то по мере поворота фрезы по часовой стрелке затылование профиля начинается от точки *A* и далее в контакт с резцом вступают точки *B*, *C*, *D*. Таким образом, когда точка *D* дойдет до оси, левая часть профиля будет уже отзатылована. Поэтому в осевом сечении зуба профиль будет несимметричен и повернут на угол ϕ к оси фрезы. При этом углы $\alpha_{\text{лев}} \neq \alpha_{\text{прав}}$.

Из рис. 10.24, *a* следует

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{EE_1}{EC} = \frac{BE \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}}{EC} = \frac{EC \operatorname{tg} \lambda_{m0} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}}{EC} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \operatorname{tg} \lambda_{m0}$$

Подставим в это уравнение значения $\alpha_{\text{в}}$ из выражения (10.38), $\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$ из (10.36) и принимая $d_{a0} \approx d_{m0}$, получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_z z_0}{\pi d_{a0}} \cdot \frac{\pi d_{m0}}{T} = \frac{k_z z_0}{T}. \quad (10.40)$$

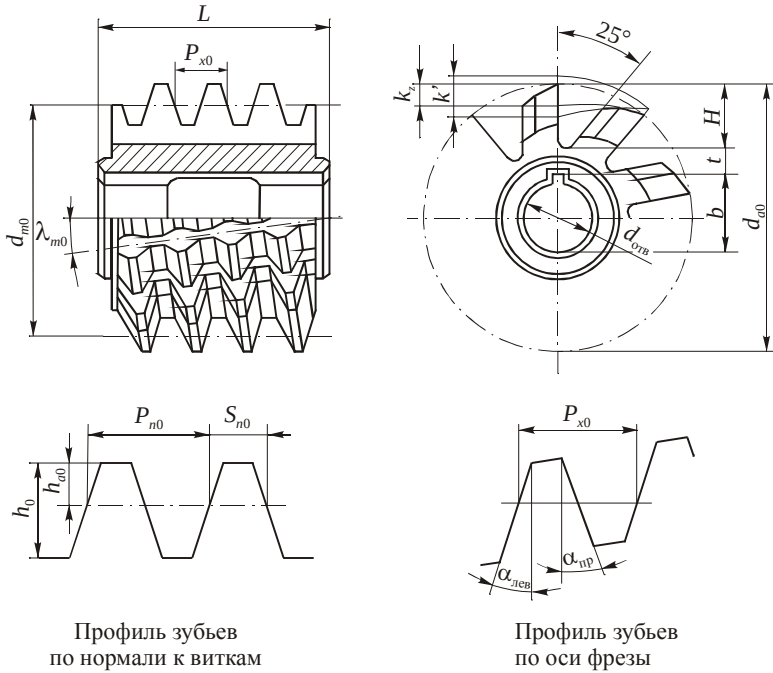


Рис. 10.24. Червячная фреза архимедова типа

Углы профиля $\alpha_{\text{лев}}$ и $\alpha_{\text{прав}}$ найдем из рис. 10.24, б, на котором в увеличенном масштабе представлены профили зуба в осевом сечении до затылования (пунктирной линией) и после затылования (сплошной).

Для правой стороны профиля после затылования при $A_1A_2 = OA$

$$\operatorname{ctg} \alpha_{\text{прав}} = A_2C/OA; \quad A_2C = OC - OA_2 = OA (\operatorname{ctg} \alpha_0 - \operatorname{tg} \varphi). \quad (10.41)$$

Следовательно, $\operatorname{ctg} \alpha_{\text{прав}} = \operatorname{ctg} \alpha_0 - \operatorname{tg} \varphi$. Аналогично найдем для левой стороны $\operatorname{ctg} \alpha_{\text{лев}} = \operatorname{ctg} \alpha_0 + \operatorname{tg} \varphi$. Подставив $\operatorname{tg} \varphi$ из уравнения (10.40) и учитывая направления витков фрезы, запишем уравнения в общем виде

$$\begin{cases} \operatorname{ctg} \alpha_{\text{прав}} = \operatorname{ctg} \alpha_0 \mp k_z z_0 / T; \\ \operatorname{ctg} \alpha_{\text{лев}} = \operatorname{ctg} \alpha_0 \pm k_z z_0 / T. \end{cases} \quad (10.42)$$

Здесь верхние знаки относятся к правозаходным фрезам, а нижние – к левозаходным.

Сведения по размерам и углам профиля на рабочих чертежах фрезы принято указывать следующим образом. Для конволютных червячных фрез показывают линейные и угловые параметры профиля в нормальном сечении к виткам, т.е. приводят размеры контура исходной инструментальной рейки. Для архимедовых фрез с винтовыми стружечными канавками показывают два сечения – нормальное и осевое. В первом указывают линейные размеры исходного контура рейки, а во втором – осевой шаг P_x и углы профиля $\alpha_{\text{лев}}$ и $\alpha_{\text{прав}}$. Пример оформления рабочего чертежа архимедовой фрезы приведен на рис. 10.24.

Определение некоторых конструктивных параметров червячных фрез.

Наружный диаметр фрезы d_{a0} . При назначении этого диаметра необходимо учитывать следующие противоречивые обстоятельства: с увеличением d_{a0} повышаются точность и производительность при нарезании зубьев, но увеличиваются расход инструментального материала, крутящий момент и потребляемая мощность, а также время на врезание.

По ГОСТ 9324–80 (в ред. 1992 г.) рекомендуется для фрез общего назначения с $m = 1 \dots 25$ мм $d_{a0} = 40 \dots 250$ мм, для прецизионных фрез с $m = 1 \dots 10$ мм $d_{a0} = 71 \dots 180$ мм, а для сборных фрез с $m = 8 \dots 25$ мм $d_{a0} = 180 \dots 340$ мм.

Наименьшую величину d_{a0} рассчитывают следующим образом. При данном модуле m , задавшись значением угла подъема витков γ_{m0} , по уравнению (10.30) определяют диаметр делительного цилиндра:

$$d_{m0} = m / \sin \gamma_{m0}.$$

В этой формуле рекомендуется принимать $\gamma_{m0} = 3 \dots 6^\circ$ для чистовых фрез и $\gamma_{m0} \leq 3^\circ$ – для прецизионных фрез.

Затем рассчитывают наружный диаметр

$$d_{a0} = d_{m0} + 2h_{a0}, \text{ где } h_{a0} = 1,25m.$$

Полученное значение d_{a0} округляют до ближайшего большего стандартного значения.

Во всех случаях при проектировании фрезы необходимо учитывать диаметр отверстия под оправку, высоту стружечных канавок, наимень-

шую толщину тела фрезы, а также глубину шпоночного паза, обеспечивающую его прочность при закалке, и жесткость крепления.

Необходимо, чтобы

$$d_{a0} \geq d_{отв} + 2H_K + 2t, \quad (10.43)$$

где $d_{отв}$ – диаметр посадочного отверстия; $H_K = h_0 + k_z + r$ – высота канавки зуба (здесь h_0 – рабочая высота зуба, k_z – величина падения затылка, $r = 1 \dots 2$ мм – радиус у основания зуба, $t = (0,25 \dots 0,30)d_1$ – толщина стенки опасного сечения).

Диаметр оправки $d_1 = d_{отв}$ можно определять по уравнению $d_1 = (0,2 \dots 0,45)d_{a0}$ или, исходя из значения модуля, $d_1 = 20m^{0,373}$, а для фрез повышенной точности $d_1 = 27m^{0,4}$.

Полученное значение d_1 округляется до ближайшего из нормально-го ряда диаметров оправок.

Расчетный диаметр делительного цилиндра d_{m0}^* . Этот, хотя и условный, параметр является очень важным, так как от него зависит расчетное значение угла подъема витков фрезы γ_{m0} (10.30), а следовательно, и погрешности профилирования. Он является также исходной величиной для расчета основных параметров фрезы.

При переточке фрезы с затылованными зубьями по передней поверхности из-за наличия задних углов ее диаметр уменьшается, γ_{m0} увеличивается (см. уравнение (10.30)), осевой шаг P_{x0} уменьшается (см. (10.29)). Это приводит к появлению дополнительной погрешности при нарезании зубчатых колес.

С целью снижения погрешностей расчетное сечение $O - O$ (рис. 10.25), используемое для назначения d_{m0}^* , принимают отстоящим от передней поверхности на величину $(0,10 \dots 0,25)\varepsilon$, где $\varepsilon = 2\pi/z_0$ – угловой шаг между зубьями фрезы в торцевом сечении.

Таким образом, фактически расчетное значение диаметра делительного цилиндра будет несколько меньше, чем измеренное по передней поверхности, т.е.

$$d_{m0}^* = d_{m0} - 2\sigma k_z = d_{a0} - 2h_{a0} - 2\sigma k_z,$$

где σ – коэффициент ($\sigma = 0,10 \dots 0,15$).

Угол γ_{m0} определяется по d_{m0}^* , благодаря чему при переточках погрешности профиля зуба фрезы снижаются в 2 раза.

Длина фрезы L должна обеспечить полное профилирование зубьев нарезаемого колеса и резание без перегрузки крайних зубьев фрезы.

Ориентировочно, без учета угла наклона оси фрезы, при зацеплении с деталью, минимальную длину фрезы L_1 можно определить из

рис. 10.26. Из треугольника AOB $L_1 = 2\sqrt{r_{a1}^2 - r_{f1}^2}$. Рабочую длину фрезы берут несколько больше, а именно

$$L = 2\sqrt{r_{a1}^2 - r_{f1}^2} + nP_{x0}. \quad (10.44)$$

Последнее слагаемое в уравнении (10.44) – это добавка на передвижку фрезы вдоль оси в процессе эксплуатации. Коэффициент $n = 1 \dots 16$ берется в зависимости от величины модуля. При этом наибольшие значения n должны соответствовать меньшим модулям. Необходимость в осевой передвижке вызвана тем, что зубья фрезы в процессе резания нагружены неравномерно. Наибольшая нагрузка приходится на крайние с торца зубья, и они изнашиваются быстрее. Поэтому с целью повышения срока службы фрезы по мере износа ее зубьев производят несколько осевых передвижек.

С обеих торцов фрезы делают цилиндрические буртики (рис. 10.24)

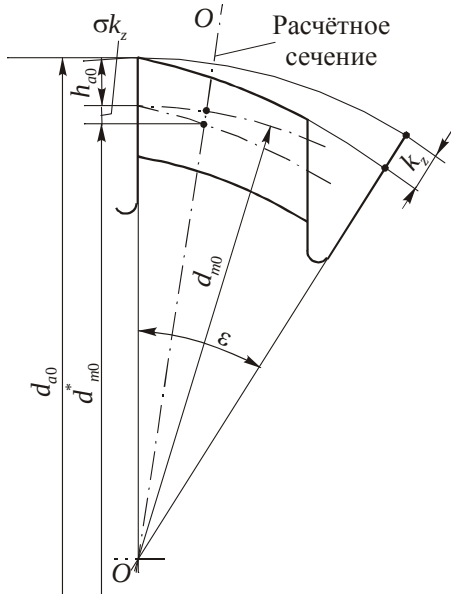


Рис. 10.25. Схема определения среднего расчетного диаметра червячной фрезы

шириной 4...6 мм и диаметром равным $(1,5 \dots 1,7)d_{\text{отв}}$. Они служат для контроля радиального и торцевого биений фрезы на оправке зубофрезерного станка.

Из уравнения (10.44) следует, что с увеличением числа зубьев и, соответственно, диаметра нарезаемого колеса, длина фрезы увеличивается. Например, для колеса $m = 5$ мм диаметром 5000...6000 мм длина фрезы должна быть около 300 мм. Изготовление таких фрез затруднительно. Длина фрезы может быть уменьшена, если нагрузку на крайние зубья распределить на другие, рядом расположенные. Для этого с входной стороны фрезы делают заборный конус длиной $L_{3,к}$, равной

двум шагам, и с углом $2\varphi = 18...30^\circ$ (рис. 10.26, б). Это существенно повышает стойкость фрезы.

Геометрические параметры зубьев фрезы. На вершинной режущей кромке с целью удобства изготовления и переточки фрез чаще всего передний угол $\gamma_B = 0$, а задний угол, получаемый затылованием, $\alpha_B = 10...12^\circ$. Черновые фрезы с целью облегчения процесса резания могут изготавливаться с $\gamma_B = 10...15^\circ$.

При радиальном затыловании, как было показано выше (рис. 10.22), одновременно создаются задние углы также на боковых режущих кромках. На рис. 10.27 показана схема определения бокового заднего угла в нормальном сечении α_N . При перемещении затылующего резца в радиальном направлении к оси фрезы на величину K_p режущая кромка одновременно переместится в направлении нормали к боковой кромке фрезы на величину

$$K_N = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_N.$$

Так как отношение $K_N / K_p = \sin \alpha_0$, то

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha_B \sin \alpha_0. \quad (10.45)$$

По аналогии для переднего угла на боковой кромке можно записать:

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \operatorname{tg} \gamma_{\text{бок}} \sin \gamma_0. \quad (10.46)$$

Анализ этих уравнений показывает, что на боковых режущих кромках передние и задние углы значительно меньше по величине, чем на вершинной кромке, и далеки от оптимального значения с точки зрения стойкости. Так, для стандартной червячной фрезы при $\alpha_0 = 20^\circ$, $\gamma_B = 12^\circ$, $\alpha_B = 10...12^\circ$ имеем $\gamma_N = 2^\circ 30'$, $\alpha_N = 2^\circ 30'...3^\circ$.

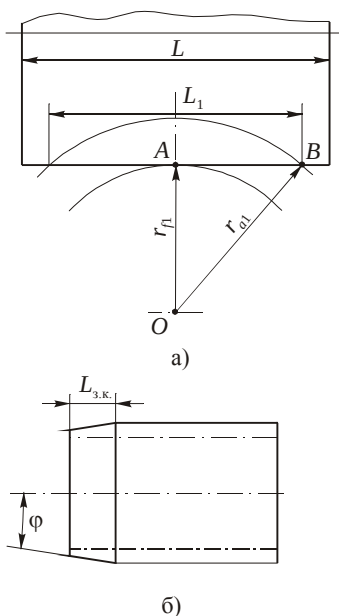


Рис. 10.26. Схема определения некоторых параметров червячной фрезы: а - длины фрезы; б - червячная фреза с заборным конусом

Примечания:

1. В уравнениях (10.45) и (10.46) не учтено влияние угла наклона оси фрезы к торцу нарезаемого колеса и перепада диаметров d_{a0}/d_{f0} ввиду малой значимости.

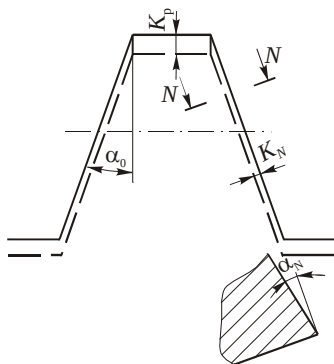


Рис. 10.27. Схема определения заднего угла на боковых кромках зубьев червячной фрезы

2. О влиянии направления стружечных канавок на кинематические передние углы на боковых режущих кромках см. п. «Стружечные канавки фрезы».

Основные направления совершенствования конструкций червячных зуборезных фрез. Цели совершенствования: повышение производительности и срока службы, упрощение технологии изготовления и эксплуатации фрез.

Основные направления совершенствования конструкций фрез:

- а) экономия инструментальных материалов за счет применения сборных конструкций и использования более эффективных из них;
- б) изменение схем резания и профиля режущих кромок;
- в) создание фрез с незатылованными зубьями, имеющими в то же время благоприятную геометрию режущих кромок.

Так как червячные фрезы весьма сложны в изготовлении и дорогостоящи, то применение новых инструментальных материалов, таких как быстрорежущие стали с повышенным содержанием кобальта и ванадия, твердые сплавы и композиты, дает значительный экономический эффект за счет увеличения скорости резания и стойкости инструмента.

Фрезы твердосплавные и оснащенные композитом применяются довольно редко из-за низкой надежности и высокой стоимости. Наибольший эффект они обеспечивают при обработке хрупких материалов, например изделий из высокопрочных чугунов, пластмасс, а также закаленных сталей.

На стойкость фрез существенно влияет принятая схема резания, определяющая нагрузку на зубья. У стандартных фрез, например, активно используется 15...20% длины режущих кромок по периметру. При этом наибольший объем срезаемого металла приходится на вершинные режущие кромки, особенно тех зубьев, которые первыми вступают в резание. Эти зубья быстрее изнашиваются и оказывают определяющее

влияние на период стойкости инструмента. Этот недостаток стремятся изменить применением червячных фрез с заборным конусом, а также фрез с дифференцированными схемами резания (рис. 10.28). Фрезы с заборным конусом более эффективны при диагональном методе фрезерования, когда суппорт с фрезой одновременно перемещается в двух направлениях: вдоль оси фрезы и вдоль оси колеса. При этом значительно увеличивается число огибающих резцов и снижается шероховатость обработанных поверхностей зубьев колеса и самое главное – зубья фрезы изнашиваются равномерно по всей ее длине.

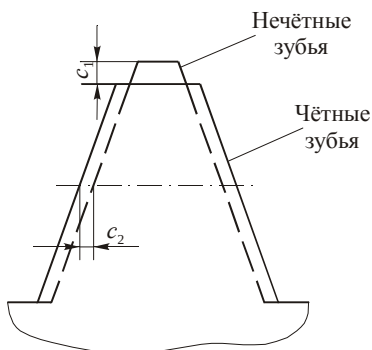


Рис. 10.28. Оптимальная схема резания при зубофрезеровании

При одновременной работе вершинной и боковых режущих кромок зуба фрезы срезаемый слой имеет сложную форму, что приводит к повышению степени его деформации, температуры резания и интенсивности износа инструмента. Для создания более благоприятных условий резания на всех режущих кромках размеры зубьев изменяют по высоте и ширине через один зуб, как показано на рис. 10.28. В результате срезаются более толстые и короткие стружки раздельно вершинными и боковыми режущими кромками.

Стойкость таких фрез существенно возрастает.

Червячные фрезы с затылованными зубьями хотя и получили наибольшее применение, однако имеют ряд недостатков, снижающих их стойкость: операция затылования сложна и трудоемка, она требует изготовления специальных кулачков и инструмента, оставляет следы удара на режущих зубьях; задние углы на боковых режущих кромках малы, что снижает стойкость фрез. Поэтому появилось много вариантов конструкций сборных фрез с вставными и поворотными рейками, у которых процесс затылования заменен шлифованием по окружности и по винтовым боковым поверхностям (рис. 10.29).

По первому варианту (рис. 10.29, а) зубчатые рейки устанавливаются вначале в технологический корпус со смещением относительно радиальной плоскости на величину h , обтачиваются и шлифуются по всему профилю, а затем крепятся в рабочем корпусе без смещения. Благодаря

этому на всех режущих кромках возникают задние углы, равные $\sin \alpha_g = h/r_a$.

Процесс шлифования по сравнению с затылованием весьма производителен, точен и прост в исполнении. Рейки, имеющие малый объем, можно изготавливать из качественных быстрорежущих сталей с низким баллом карбидной неоднородности и, соответственно, с высокими стойкостными и прочностными характеристиками.

По второму варианту (рис. 10.29, б) обтачивание и шлифование реек производится при креплении их в одном и том же корпусе, который является и технологическим, и рабочим. Вначале рейки обтачивают и шлифуют по окружности и по боковым сторонам, как обычный червяк, а затем поворачивают на 180° и устанавливают в те же пазы. Задние углы на рейках создаются за счет того, что профиль пазов несимметричен и их боковые стенки имеют разные углы наклона σ_1 и σ_2 относительно радиальной плоскости ОА. Этот вариант не требует специального технологического корпуса и обеспечивает более высокую точность, чем первый.

Одним из эффективных способов повышения производительности

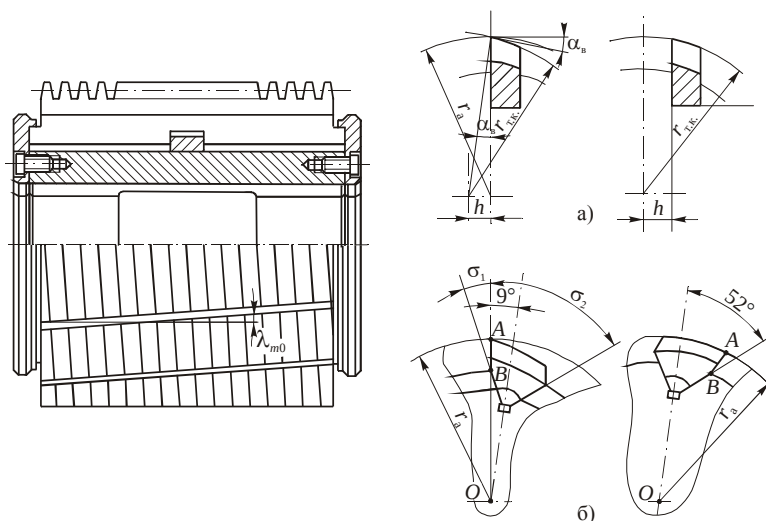


Рис. 10.29. Фрезы сборные со вставными рейками (первое положение реек – рабочее, второе – при шлифовании): а – рейками, затачиваемыми в технологическом корпусе; б – с поворотными рейками

при зубофрезеровании является применение многозаходных червячных фрез. При работе такой фрезы за один ее оборот вокруг оси колесо поворачивается на a/z оборота, где a – число заходов, и каждый виток с расположенными на нем режущими зубьями обрабатывает свою впадину, т.е. нарезание зубьев идет быстрее в a раз. Однако при этом уменьшается число профилирующих зубьев на одном витке фрезы, что приводит к ухудшению качества обработанной поверхности зубьев и снижению точности профилирования из-за значительного увеличения угла подъема витков γ_{m0} . Поэтому на практике такие фрезы применяются с числом заходов не более трех и только при черновом зубонарезании. Часто профиль зуба у них делают модифицированным с оставлением припуска под шевингование (см. рис. 10.52).

В массовом производстве крупномодульных колес используют различные конструкции фрез с уменьшенным углом профиля до $\alpha_r = 15^\circ$ при угле зацепления $\alpha_0 = 20^\circ$, которые обеспечивают более высокую производительность и стойкость за счет перераспределения нагрузки между режущими кромками зубьев фрезы и увеличения числа профилирующих режущих кромок. Так как при этом снижается шероховатость поверхности, их можно делать многозаходными.

Недостатком таких фрез является то, что они теряют универсальность, т.е. превращаются в специальные, пригодные только для обработки определенного колеса с заданным числом зубьев. Вопросы расчета таких фрез подробно изложены в [21, 22].

10.4. Зуборезные долбяки

Назначение, область применения и типы долбяков. Долбяк представляет собой режущий инструмент, выполненный в виде зубчатого колеса, у которого вершины и боковые стороны зубьев снабжены передними и задними углами.

Долбяки предназначены для нарезания зубьев цилиндрических прямозубых, косозубых и шевронных колес, а также колес внутреннего зацепления. Долбяки незаменимы при нарезании зубьев в упор, например на блочных колесах или колесах с фланцами. Они обеспечивают большую производительность при нарезании колес с узким буртом и большим числом зубьев, при нарезании зубчатых секторов и реек. Следует отметить их высокую технологичность, возможность достижения высокой точности при изготовлении и широкую универсальность в применении.

Изготавливают долбяки из быстрорежущей стали и очень редко снабжают твердосплавными пластинами.

На рис. 10.30 показана схема работы долбяка. Долбяк крепится на штосселе специального зубодолбежного станка и работает по методу обкаточного огибания. Движение резания v_p (главное движение) долбяк осуществляет при перемещении вниз вдоль оси, затем следует холостое движение вверх и поворот долбяка относительно заготовки, т.е. происходит обкат инструмента и заготовки по начальным окружностям без скольжения. Перед холостым ходом вверх (v_{xx}) долбяк отводится на небольшое расстояние S_{xx} от заготовки во избежание трения задней поверхности об обработанную поверхность. Таким образом, долбяк осуществляет возвратно-поступательные движения и вращательное относительно своей оси.

Подача (круговая), определяющая толщину слоя, срезаемого боковыми режущими кромками, осуществляется при относительном вращении долбяка и заготовки и измеряется по делительной окружности – S_0

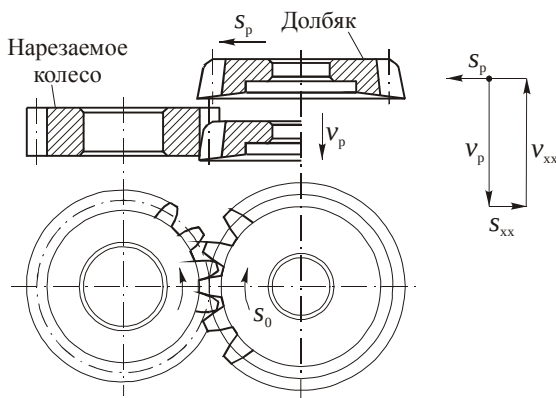


Рис. 10.30. Схема работы зуборезного долбяка

мм/дв.ход. Кроме того, долбяк получает радиальную подачу при врезании в заготовку S_p мм/дв.ход.

Профиль зубьев нарезаемого колеса образуется как огибающая различных положений режущих кромок долбяка относительно заготовки.

Из-за прерывистости процесса резания и невозможности развивать высокие скорости резания вследствие больших сил инерции долбяк по производительности уступает червячным фрезам.

В машиностроении применяются следующие типы конструкций долбяков: дисковые, чашечные (втулочные) и хвостовые (рис. 10.31). Их различие заключается в том, что у чашечных долбяков, работающих в упор, элементы крепления размещаются в специальной выемке или во втулке во избежание контакта с упором. Хвостовые долбяки имеют малый диаметр и применяются при нарезании колес внутреннего зацепления и мелко модульных колес ($m < 1$ мм). Для нарезания косозубых и шевронных колес применяют косозубые долбяки.

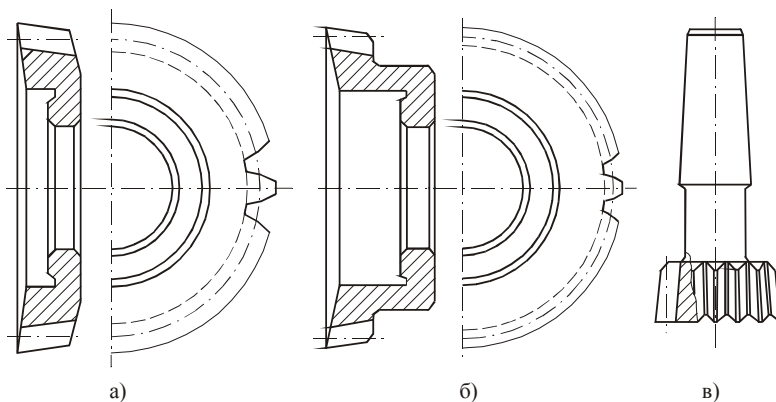


Рис. 10.31. Типы конструкций долбяков:
а – дисковый; б – чашечный; в – хвостовой

Стандартные долбяки (ГОСТ 9323–79) изготавливаются трех классов точности АА, А и В для нарезания колес соответственно 6, 7 и 8-й степеней точности.

К числу недостатков долбяков следует отнести: сложность кинематики зубодолбежных станков, ограничения применимости по числу зубьев нарезаемых колес из-за вносимых погрешностей в их профиль. Наружный диаметр долбяков ограничивается опасностью их перекоса при консольном креплении на станке.

Конструктивные и угловые параметры долбяка. Долбяк – это корригированное зубчатое колесо с непрерывно изменяемым смещением профиля по длине зуба, уменьшающимся от переднего торца к опорному.

Такая картина коррекции обеспечивает, как будет показано ниже, создание задних углов на боковых режущих кромках долбяка. Задняя поверхность вершинной кромки – усеченный конус, создающий задний

угол на ней – $\alpha_{\text{в}}$, передняя поверхность – также усеченный конус, образующая которого составляет с торцом долбяка передний угол $\gamma_{\text{в}}$.

На рис. 10.32 представлены разрез долбяка плоскостью, проходящей через его ось, а также три характерных сечения плоскостями, перпендикулярными к оси долбяка. В сечении I–I смещение профиля максимальное положительное; в сечении II–II оно равно нулю, а в сечении III–III – максимальное отрицательное (до этого сечения возможна переточка долбяка по передней поверхности).

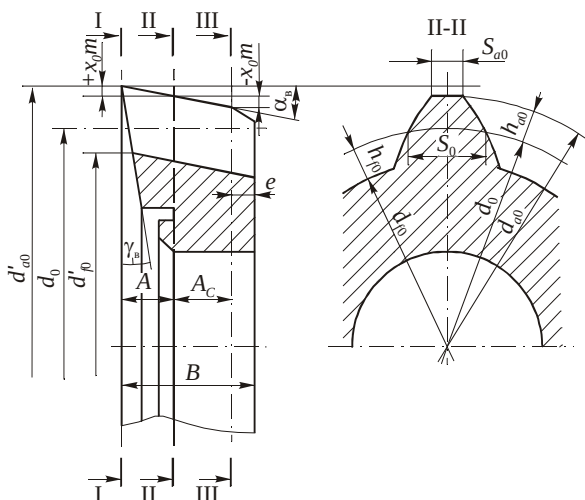


Рис. 10.32. Основные параметры долбяка

Сечение II–II называется **исходным**, а расстояние от него до переднего торца – **исходным расстоянием** нового долбяка A . Соответственно расстояние от II–II до III–III будет исходным расстоянием окончательно сточенного долбяка A_c .

Как видно из рис. 10.32,

$$A = \frac{x_0 m}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}}; \quad (10.47)$$

$$A_c = \frac{|-x_0 m|}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}}, \quad (10.48)$$

где x_0 – коэффициент смещения долбяка, изменяющийся от максимального положительного до отрицательного значений.

Величины расстояний A и A_c могут быть равны или отличаться, иногда существенно, в зависимости от модуля и числа зубьев долбяка, они также зависят от числа зубьев нарезаемых колес и технологических условий изготовления долбяков.

К особенностям конструкции долбяка относится постоянство делительной и основной окружностей во всех сечениях, т.е. эвольвентные боковые режущие кромки образованы от одной и той же основной окружности, диаметр которой

$$d_{b0} = d_0 \cos \alpha = mz_0 \cos \alpha. \quad (10.49)$$

От величины смещения x_0 меняется соотношение высот головки и ножки зуба долбяка, а следовательно, и размеры окружностей выступов и впадин долбяка. При этом высота зубьев остается неизменной во всех сечениях.

Таким образом, в сечении I–I:

высота головки зуба

$$h'_{a0} = 1,25m + x_0m; \quad (10.50)$$

диаметр окружности выступов

$$d'_{a0} = d_0 + 2h'_{a0} = mz_0 + 2,5m + 2x_0m; \quad (10.51)$$

высота ножки зуба

$$h'_{f0} = 1,25m - x_0m; \quad (10.52)$$

диаметр окружности впадин

$$d'_{f0} = d_0 - 2h'_{f0} = mz_0 - 2,5m + 2x_0m; \quad (10.53)$$

полная высота зуба

$$h_0 = h'_{a0} + h'_{f0} = 2,5m.$$

Здесь штрих вверху обозначения параметра указывает, что он относится к сечению I–I.

По аналогии эти параметры можно записать и для сечения III–III, сменив лишь знак перед x_0m с положительного на отрицательный и обозначив их двумя штрихами (h''_{a0} , h''_{f0} , d''_{a0} , d''_{f0}).

стки эвольвенты, смещенные относительно центра основной окружности (см. рис. 10.5).

Поэтому независимо от величины стачивания зуба долбяка по передней поверхности при нарезании зубчатых колес он будет образовывать один и тот же эвольвентный профиль.

Как было показано выше (рис. 10.6), при наличии высотной коррекции за счет смещения исходного контура рейки меняется положение делительной прямой рейки относительно центра колеса. Это приводит к тому, что изменяется не только соотношение высот головки и ножки зуба долбяка, но и меняется толщина зуба по делительной окружности, которая, как следует из рис. 10.6, может быть определена по формуле

$$S_0 = \pi m / 2 \pm 2x_0 m \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (10.54)$$

Как видно из рис. 10.34, на развертке сечения зуба долбяка **делительным** цилиндром такое изменение толщины создает задний угол на боковых режущих кромках – α_r :

$$\operatorname{tg} \alpha_r = x_0 m \operatorname{tg} \alpha_0 / A.$$

Подставим в это уравнение значение A из выражения (10.47) и после сокращения получим

$$\operatorname{tg} \alpha_r = \frac{x_0 m \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_b}{x_0 m} = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_b. \quad (10.55)$$

Очень важным угловым параметром, обязательно указываемым на рабочем чертеже, является задний угол в цилиндрическом сечении **основным** цилиндром – α_{rb} . По нему устанавливается торец шлифоваль-

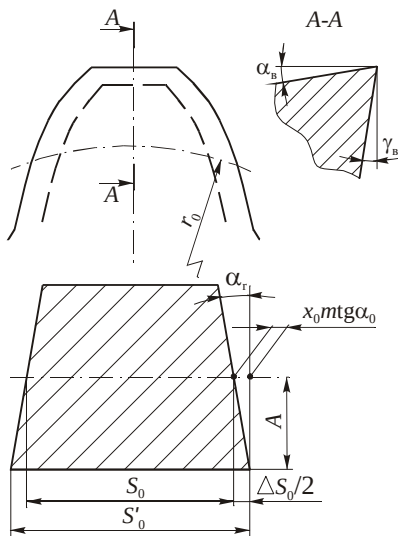


Рис. 10.34. Развертка сечения зуба долбяка делительным цилиндром

ного круга относительно оси при шлифовании боковых поверхностей зубьев долбяка.

В любом цилиндрическом сечении зуба долбяка задний угол можно найти как угол между осью и винтовой линией, лежащей на поверхности этого цилиндра. При этом винтовые линии во всех сечениях имеют один и тот же осевой шаг, так как принадлежат одной винтовой поверхности. Развертки винтовых линий на плоскость представляют собой гипотенузы прямоугольных треугольников, у которых один катет – осевой шаг P_x , а второй – развертка окружности цилиндра (рис. 10.35). Рассмотрим два сечения: основным цилиндром с радиусом r_b и делительным цилиндром с радиусом r .

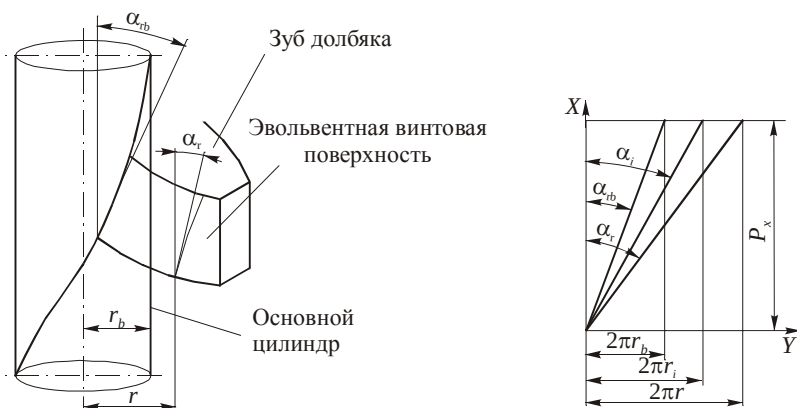


Рис. 10.35. Задний угол на боковых режущих кромках зуба долбяка в цилиндрических сечениях

Из рис. 10.35 следует, что

$$P_x = \frac{2\pi r}{\operatorname{tg} \alpha_r} = \frac{2\pi r_b}{\operatorname{tg} \alpha_{rb}} = \frac{2\pi r_i}{\operatorname{tg} \alpha_i},$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{r_i}{r} \operatorname{tg} \alpha_r. \quad (10.56)$$

Согласно уравнению эвольвенты, при $r_i = r_b$ отношение $r_b / r = \cos \alpha_0$, тогда в соответствии с выражением (10.56)

$$\operatorname{tg} \alpha_{rb} = \frac{r_b}{r} \operatorname{tg} \alpha_r = \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_r. \quad (10.57)$$

Подставим значение α_r из уравнения (10.55) и найдем, что

$$\operatorname{tg} \alpha_{rb} = \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_s \cos \alpha_0 = \sin \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_s. \quad (10.58)$$

Для стандартных долбяков при $\alpha_0 = 20^\circ$ и $\alpha_s = 6^\circ$, $\alpha_{rb} = 2^\circ 4' 32''$.

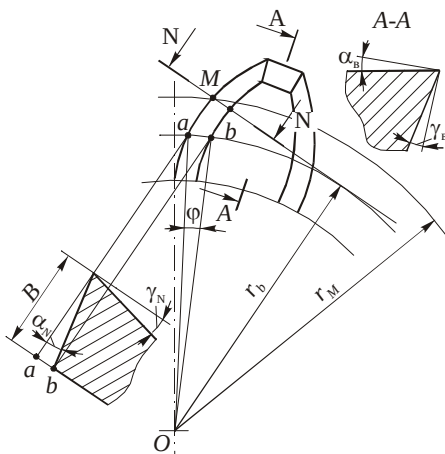


Рис. 10.36. Схема определения заднего угла в сечении нормальном к боковой режущей кромке зуба долбяка

С точки зрения процесса резания на рабочем чертеже долбяка также необходимо указать задний и передний углы на боковых режущих кромках в нормальном сечении — α_N и γ_N .

Найдем угол α_N , пользуясь рис. 10.36, на котором вид на зуб долбяка представлен со стороны опорного торца. Задний угол в нормальном сечении в любой произвольно взятой

точке M найдем, проведя из нее касательную к основной окружности на том основании,

что эта прямая является одновременно образующей эвольвенты и нормалью к ней.

Из рис. 10.36 следует, что в нормальном сечении боковой режущей кромки задний угол

$$\operatorname{tg} \alpha_N = ab / B. \quad (10.59)$$

Из условия обката прямой — образующей эвольвенты по основному цилиндру без скольжения, $ab = \widehat{ab} = r_b \varphi$.

Как было показано выше (рис. 10.33), эвольвента при перемещении вдоль оси от переднего к опорному торцу одновременно поворачивается вокруг оси на угол φ . Исходя из того, что при повороте эвольвенты вокруг оси на 2π она переместится вдоль оси на величину осевого шага P_x , запишем соотношение

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{B}{P_x},$$

из которого следует, что

$$\varphi = 2\pi B / P_x. \quad (10.60)$$

Подставив значение φ в уравнение (10.59), найдем, что

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \frac{r_b 2\pi B}{BP_x} = r_b \frac{2\pi}{P_x}. \quad (10.61)$$

Отношение $P_x / 2\pi$ называется **винтовым параметром**. Эта характеристика винтовой поверхности является постоянной величиной.

Таким образом, входящие в правую часть уравнения (10.61) величины не зависят от положения точки на эвольвенте и остаются неизменными для данного долбяка. Следовательно, задний угол в нормальном сечении на боковых режущих кромках долбяка во всех точках остается также одинаковым.

Если теперь в уравнение (10.61) подставить значение P_x из рис. 10.35, а α_{rb} из выражения (10.58), то найдем, что

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \frac{r_b 2\pi \operatorname{tg} \alpha_{rb}}{2\pi r_b} = \operatorname{tg} \alpha_b \sin \alpha_0. \quad (10.62)$$

Таким образом, долбяк, имеющий фасонные боковые режущие кромки, обладает уникальным свойством: постоянством заднего угла в нормальном сечении по всей длине режущей кромки, в то же время как в цилиндрическом сечении задний угол является величиной переменной, зависящей от величины радиуса окружности, проходящей через точку режущей кромки (см. уравнение (10.56)).

Передний угол долбяка γ_b на вершинной кромке задается в радиальной плоскости. В нормальном сечении на боковой режущей кромке в некоторой точке M на радиусе r_M по аналогии с определением угла α_N найдем, что

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \operatorname{tg} \gamma_b \sin \alpha_M, \quad (10.63)$$

где α_M – угол профиля в точке M , а $\cos \alpha_M = r_b / r_M$ (см. уравнение эвольвенты).

Из (10.63) следует, что γ_N – величина переменная, зависящая от r_M – радиуса окружности, на которой лежит точка M . Например, для стан-

дартных долбяков с $\gamma_b = 5^\circ$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $m = 2,5$ мм и $z_0 = 30$ на окружности впадин $\gamma_N = 0^\circ 13'$, а на окружности выступов – $\gamma_N = 2^\circ 36'$.

На делительной окружности при $r_M = r_0 = mz_0/2$, $\alpha_M = \alpha_0 = 20^\circ$, $\gamma_b = 5^\circ$

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \operatorname{tg} \gamma_b \sin \alpha_0 = 1^\circ 40'. \quad (10.64)$$

Этот угол также указывается на рабочем чертеже долбяка. Как следует из формулы (10.64), он не зависит от модуля и числа зубьев долбяка. С целью снижения сил резания и повышения стойкости долбяков его можно увеличить только за счет увеличения γ_b , задаваемого при расчете.

Коррекция угла профиля долбяка. Боковые режущие кромки зубьев долбяка являются следом пересечения конической передней поверхности с эвольвентными винтовыми задними поверхностями (левой и правой). Поэтому хотя величины передних и задних углов невелики, профиль режущих кромок отличается от теоретической эвольвенты, что сказывается на профиле зубьев нарезаемых колес.

Уравнение режущей кромки можно определить аналитически, решив совместно уравнения конической и эвольвентной поверхностей, которым одновременно принадлежат точки режущих кромок.

Пример графического решения этого уравнения показан на рис. 10.37, а для случая $m = 5$ мм, $z_0 = 20$. После совмещения проекции режущей кромки на торцевую плоскость и теоретической эвольвенты видно, что характер отклонений весьма неблагоприятен, так как ошибки по головке и ножке направлены в разные стороны и приводят к значительному утолщению зуба долбяка на вершине и, соответственно, к подрезу ножки зуба нарезаемого колеса. Для уменьшения величины отклонений и равномерного их распределения было предложено ввести коррекцию угла профиля долбяка в сторону небольшого увеличения. При этом величина погрешности будет меньшей и более благоприятной (рис. 10.37, б), а именно отклонения имеют одинаковую направленность в сторону утолщения головки и ножки зуба долбяка. Боковая поверхность нарезанных зубьев колеса становится при этом более выпуклой, что обеспечивает плавность работы зубчатого зацепления. Отклонения же по ножке и головке зуба очень малы, например, для нашего случая они равны соответственно, $\Delta_a = 7,5$ мкм, $\Delta_f = 7,1$ мкм.

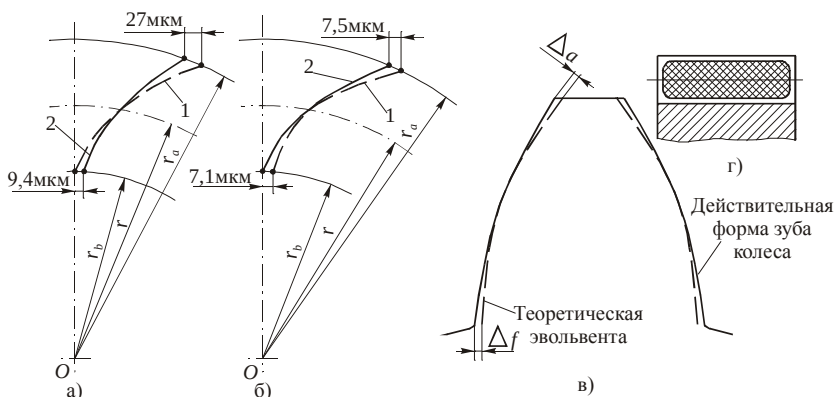


Рис. 10.37. Вид и величины отклонений проекции режущей кромки (2) долбяка от теоретической (1) эвольвенты: а – без коррекции угла профиля исходного контура; б – после коррекции этого угла; в – искажение профиля зуба колеса; г – зона касания зубьев колес, нарезанных долбяком

Для расчета коррекции угла профиля долбяка была предложена [22] следующая методика. Учитывая, что угол профиля на делительной окружности не зависит от числа зубьев долбяка z_0 , для удобства расчета принимается $z_0 = \infty$. Тогда долбяк превращается в рейку (гребенку), имеющую прямолинейные боковые режущие кромки с углом профиля в сечении $N-N-\alpha_n$ (рис. 10.38), по которому проектируется инструмент второго порядка, нарезающий зубья долбяка.

Из-за наличия переднего и заднего углов проекция профиля зубьев на плоскость переднего торца $A-A$ не совпадает с сечением $N-N$. При этом проекция высоты зуба $h = h_0 + bc$. При неизменном продольном размере e это приводит к несовпадению углов профиля α_n и α_A .

Приравняв угол профиля проекции режущей кромки α_A к углу профиля исходного контура рейки α_0 , найдем скорректированное значение угла профиля долбяка α_n .

Как следует из рис. 10.38,

$$\operatorname{tg} \alpha_A = \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{e}{h}; \quad \operatorname{tg} \alpha_n = \frac{e}{h_0} = \frac{e}{h - bc}. \quad (10.65)$$

Из Δbcd и ΔAcd найдем значение bc :

$$bc = cd \operatorname{tg} \alpha_B = h \operatorname{tg} \gamma_B \operatorname{tg} \alpha_B,$$

тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{и}} = \frac{e}{h(1 - \operatorname{tg} \gamma_{\text{в}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}})} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{1 - \operatorname{tg} \gamma_{\text{в}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}}. \quad (10.66)$$

Для стандартных долбяков при $\alpha_0 = 20^\circ$, $\gamma_{\text{в}} = 5^\circ$, $\alpha_{\text{в}} = 6^\circ$ скорректированное значение угла профиля из уравнения (10.66) будет равно $\alpha_{\text{и}} = 20^\circ 10' 14,5''$. Хотя величина коррекции весьма мала, проекция режущей кромки, как видно из рис. 10.37, б, будет в большей степени приближена к эвольвенте.

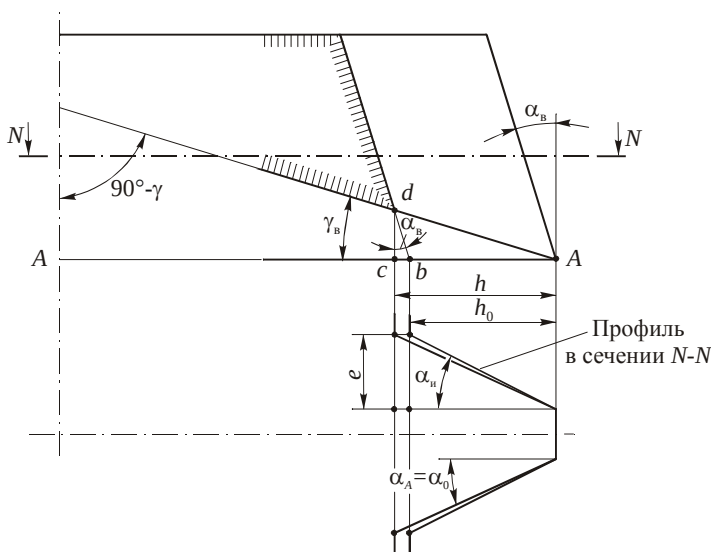


Рис. 10.38. Схема определения α_N профильного угла рейки долбяка

Изменение угла профиля неизбежно приведет к изменению диаметра основного цилиндра, так как $d_{b0} = m z_0 \cos \alpha_{\text{и}}$.

Значение $\alpha_{\text{и}}$, определяемое по уравнению (10.66), должно приниматься во внимание при изготовлении и контроле долбяка, т.е. такая же величина угла должна быть у профиля зубьев червячной фрезы или шлифовального круга, формирующих боковые поверхности зубьев долбяка. Значение скорректированного угла профиля $\alpha_{\text{и}}$ обязательно указывается на рабочем чертеже долбяка.

Хотя коррекция угла профиля долбяка в сечении $N-N$ не позволяет полностью исключить погрешности профиля зубьев нарезаемых колес по ножке и головке, но, учитывая их малую величину, на практике для повышения стойкости долбяков увеличивают передний угол γ_v до 15° , а задний α_v – до 9° .

Определение исходного расстояния долбяка. При проектировании долбяка основной задачей является определение исходного расстояния A нового и сточенного A_c долбяка, величина которого зависит от допустимых значений положительного и отрицательного смещений профиля.

Так как с точки зрения увеличения числа переточек и, следовательно, суммарной стойкости долбяка сумма значений A и A_c должна быть как можно большей, то при проектировании стремятся к назначению их максимально возможных величин.

Экспериментально установлено, что при увеличении положительного смещения повышаются стойкость долбяка и качество обработанной поверхности. При этом накладываются два ограничения:

1. С увеличением $+x_0t$ сокращается длина вершинной режущей кромки, т.е. происходит заострение зуба по вершине, на которую в процессе резания приходится наибольшая нагрузка. Это может привести к резкому снижению стойкости долбяка при переходе через определенное минимально допустимое значение длины этой кромки.

2. С ростом $+x_0t$ появляется опасность интерференции зубчатых колес, нарезанных долбяком, под которой понимают наложение различных профилей зубьев колес, нарезанных одним и тем же долбяком при зацеплении. С увеличением $+x_0t$ увеличивается высота переходной кривой ножки зуба шестерни z_1 , нарезаемой долбяком. В зацеплении с колесом z_2 незвольвентный участок шестерни может контактировать с эвольвентным профилем колеса. При этом возникают вибрации и возможна даже поломка зубьев колес. Поэтому интерференция недопустима.

При проектировании долбяков наибольшее значение $+x_0t$ обычно находят по первому ограничению, а по второму проводится проверка на отсутствие интерференции.

Расчет допустимого $+x_0t$ по первому ограничению проводят в следующей последовательности:

1. Определяется допустимая толщина зуба по наружному диаметру долбяка – S'_{a0} в сечении I–I (рис. 10.32). На основании практических данных ее рекомендуется рассчитывать по формуле

$$S'_{a0} = 0,51\sqrt{m} \quad (10.67)$$

или брать из таблиц [21].

2. На основании уравнения (10.10) для корригированных колес в сечении I-I долбяка толщину зуба по окружности выступов можно записать в следующем виде:

$$S'_{a0} = d'_{a0} (S'_0 / d_0 + \text{inv} \alpha_0 - \text{inv} \alpha'_{a0}), \quad (10.68)$$

где d'_{a0} – диаметр окружности выступов долбяка в сечении I-I (рис. 10.32):

$$d'_{a0} = m(z_0 + 2h^*_{a0} + 2x_0);$$

S'_0 – толщина зуба по делительной окружности в сечении I-I:

$$S'_0 = \pi m / 2 + 2x_0 m \text{tg} \alpha_0;$$

d_0 – диаметр делительной окружности

$$d_0 = mz_0;$$

α_0 – угол профиля долбяка ($\alpha_0 = 20^\circ$ без учета коррекции, которая мала);

α'_{a0} – угол профиля в точке на наружном диаметре в сечении I-I:

$$\cos \alpha'_{a0} = \frac{d_{b0}}{d'_{a0}} = \frac{mz_0 \cos \alpha_0}{m(z_0 + 2h^*_{a0} + 2x_0)}. \quad (10.69)$$

h^*_{a0} – коэффициент высоты головки зуба.

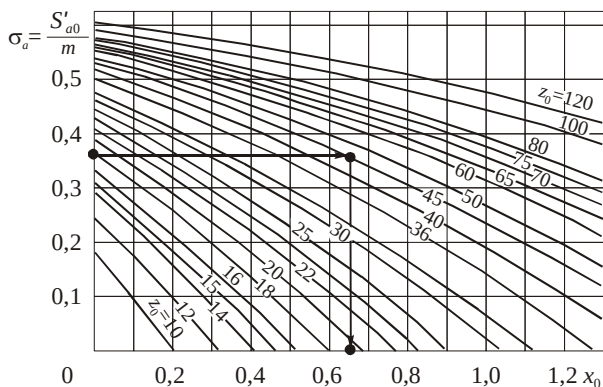


Рис. 10.39. Зависимость коэффициента смещения профиля x_0 от коэффициента ширины площадки на вершине зуба долбяка σ_a

Если подставить эти величины в уравнение (10.68), выразив S'_{a0} в долях модуля через коэффициент σ_a :

$$S'_{a0} = \sigma_a m, \quad (10.70)$$

а затем сократив правую и левую части уравнения на величину m , получим

$$\sigma_a = (z_0 + 2h_{a0}^* + 2x_0) \left(\frac{\pi + 4x_0 \operatorname{tg} \alpha_0}{2z_0} + \operatorname{inv} \alpha_0 - \operatorname{inv} \alpha'_{a0} \right). \quad (10.71)$$

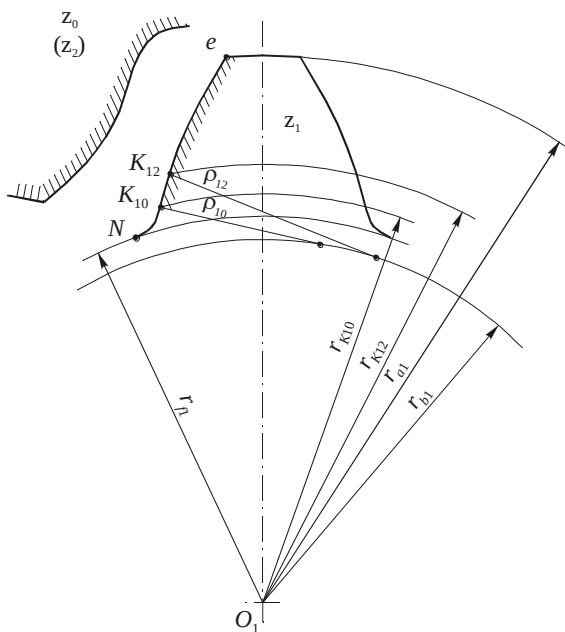


Рис. 10.40. Крайние точки контакта шестерни z_1 с зубьями долбяка K_{10} и колеса K_{12} (радиусы кривизны в этих точках соответственно ρ_{10} и ρ_{12})

Это уравнение позволяет по заданным параметрам долбяка z_0 , h_{a0}^* , α_0 и при различных значениях x_0 находить величину σ_a . Однако при проектировании долбяка решают обратную задачу: задавшись минимально допустимой величиной S'_{a0} , рассчитанной по уравнению (10.67), находят максимально допустимое значение коэффициента смещения $+x_0$. Так как решение уравнения возможно только методом подбора, то на практике применяют графическое решение

функции $\sigma_a = f(x_0)$ для различных z_0 , представленное на рис. 10.39. По этим кривым для различных σ_a и z_0 находят значение x_0 . Из рис. 10.39 можно сделать вывод, что долбяки с большим числом зубьев допускают большие значения x_0 , а следовательно, большие исходные рас-

стояния A . Как показано в [22], такое же влияние оказывает увеличение коэффициента высоты головки зуба долбяка h_{a0}^* с 1,25 до 1,3.

Проверка долбяка на отсутствие интерференции зубчатых колес в зацеплении. Интерференция (наложение) эвольвентного профиля колеса z_2 на неэвольвентную переходную кривую шестерни z_1 у ножки зуба возникает, как показывает анализ, при увеличении положительного смещения долбяка $+x_0m$, когда долбяк недорезает у шестерни z_1 требуемый для нормального зацепления пары колес $z_1 - z_2$ эвольвентный профиль.

На рис. 10.40 на боковой поверхности шестерни z_1 показаны крайние точки контакта: K_{12} – при сцеплении колес $z_1 - z_2$ и K_{10} – при нарезании зубьев шестерни z_1 долбяком z_0 , а также окружности, проходящие через эти точки с радиусами r_{K12} и r_{K10} .

Кривизна эвольвенты в этих точках характеризуется радиусами ρ_{12} и ρ_{10} , проведенными касательно к основной окружности. При этом часть бокового профиля шестерни eK_{10} , нарезанная долбяком, будет эвольвентой, а ниже расположенная переходная кривая имеет форму удлиненной эпициклоиды, образованной вершинной режущей кромкой долбяка (рис. 10.41). Участок eK_{12} – рабочий (активный) участок контакта зубьев колес $z_1 - z_2$ в зацеплении.

Зацепление сопряженных колес, нарезанных долбяком, будет правильным, если выполняется следующее условие:

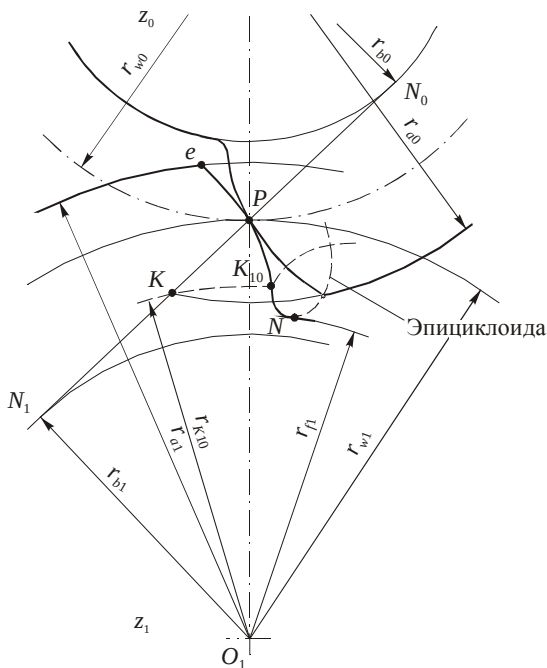


Рис. 10.41. Переходная кривая $K_{10}N$ у ножки зуба зубчатого колеса внешнего зацепления, нарезанного долбяком

$$r_{K10} \leq r_{K12} \text{ или } \rho_{10} \leq \rho_{12}$$

$$(10.72)$$

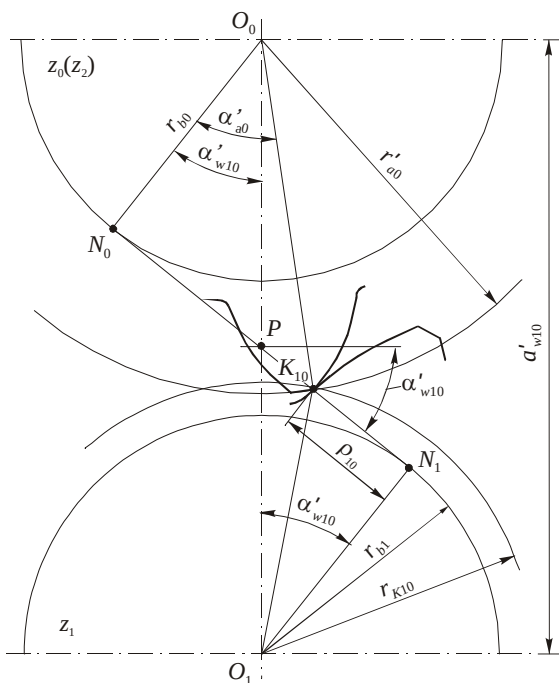


Рис. 10.42. Расчетная схема для вывода условия отсутствия интерференции зубчатых колес $z_1 - z_2$, нарезанных долбяком

При нарушении этих неравенств возникает интерференция.

На рис. 10.42 показано зацепление шестерни z_1 с долбяком z_0 . Конечную точку контакта их зубьев K_{10} найдем при пересечении окружности выступов долбяка с линией зацепления N_0N_1 . Ниже этой точки у зуба шестерни будет переходная кривая.

Из расчетной схемы (рис. 10.42) найдем условие отсутствия интерференции при зацеплении шестерни z_1 с долбяком z_0 и колесом z_2 .

Долбяк z_0 взят с

максимальным значением $+x_0m$ (сечение I-I).

Из $\triangle O_1N_1K_{10}$ следует, что

$$r_{K10} = \sqrt{r_{b1}^2 + (N_0N_1 - N_0K_{10})^2}.$$

На основании уравнения для корригированных колес (10.18) длина номинальной линии зацепления равна

$$N_0N_1 = a'_{w10} \sin \alpha'_{w10}.$$

Из рис. 10.42 видно, что

$$N_0K_{10} = \sqrt{(r'_{a0})^2 - r_{b0}^2} = r_{b0} \operatorname{tg} \alpha'_{a0}.$$

Следовательно,

$$r_{K10} = \sqrt{r_{b1}^2 + (a'_{w10} \sin \alpha'_{w10} - r_{b0} \operatorname{tg} \alpha'_{a0})^2}. \quad (10.73)$$

Если на место долбяка поставить сопрягаемое колесо z_2 , то по аналогии с (10.73), сменив только индекс 0 на 2, найдем, что

$$r_{K12} = \sqrt{r_{b1}^2 + (a_{w12} \sin \alpha_{w12} - r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_{a2})^2}. \quad (10.74)$$

В этих уравнениях r_{b1} , r_{b2} , r_{b0} – радиусы основных окружностей шестерни, колеса и долбяка; a'_{w10} и a_{w12} – межцентровые расстояния пар «шестерня – долбяк» и «шестерня – колесо». По уравнению (10.17) для корригированных колес

$$a'_{w10} = \frac{m(z_1 + z_0)}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_{w10}}; \quad a_{w12} = \frac{m(z_1 + z_2)}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_{w12}},$$

а углы зацепления по уравнению (10.16):

$$\operatorname{inv} \alpha'_{w10} = \operatorname{inv} \alpha'_0 + 2 \frac{x_1 + x_0}{z_1 + z_0} \operatorname{tg} \alpha_0; \quad \operatorname{inv} \alpha_{w12} = \operatorname{inv} \alpha_0 + 2 \frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Угол профиля на вершине зуба долбяка α'_{a0} рассчитывают по уравнению (10.69).

Подставив в неравенство (10.72) значения r_{K10} и r_{K12} из (10.73) и (10.74) и входящие в эти уравнения указанные выше величины, производя необходимые сокращения, можно записать условие отсутствия интерференции в следующем упрощенном виде:

$$(z_1 + z_2) \operatorname{tg} \alpha'_{w10} - z_0 \operatorname{tg} \alpha'_{a0} \leq (z_1 + z_2) \operatorname{tg} \alpha_{w12} - z_2 \operatorname{tg} \alpha_{a2}. \quad (10.75)$$

В случае использования радиусов кривизны эвольвенты шестерни в крайних точках контакта пар $z_1 - z_0$ и $z_1 - z_2$ это же условие, как следует из рис. 10.41, записывается так:

$$\rho_{K10} \leq \rho_{K12},$$

т.е.

$$a'_{w10} \sin \alpha'_{w10} - \sqrt{(r'_{a0})^2 - r_{b0}^2} \leq a_{w12} \sin \alpha_{w12} - \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b0}^2}. \quad (10.76)$$

В неравенствах (10.75) и (10.76) значение допустимого смещения $+x_0 m$ в явном виде не просматривается. Как видно из вышеприведенных уравнений, от него зависят параметры a'_{w10} , α'_{w10} , r'_{a0} , α'_{a0} .

Поэтому решение задачи проверки неравенств возможно только при подстановке принятого значения x_0 из первого ограничения. Если при этом окажется, что неравенства не соблюдаются, то необходимо:

- 1) уменьшить величину $+x_0$;
- 2) увеличить число зубьев долбяка z_0 ;
- 3) увеличить высоту головки зуба в исходном сечении до $h_{a0} = 1,3m$;
- 4) изменить величины x_1 и x_2 , если оба колеса корригированны.

Следует иметь в виду, что при выводе уравнений (10.75) и (10.76) в общем виде величины коэффициентов смещения x_1 , x_2 , x_0 принимались как неравные по абсолютной величине и по знаку.

Расчет допустимого отрицательного смещения долбяка. Проверка на отсутствие подреза ножки и среза головки нарезаемого колеса. В связи с тем, что величина положительного смещения $+x_0m$, а следовательно, и исходного расстояния A нового долбяка имеют жесткое ограничение, увеличить запас на переточку долбяка можно за счет отрицательного смещения профиля в направлении от исходного сечения II–II к опорному торцу до сечения III–III (см. рис. 10.32). При этом исходное расстояние сточенного долбяка равно

$$A_c = \frac{|-x_0m|}{\operatorname{tg} \alpha_s}.$$

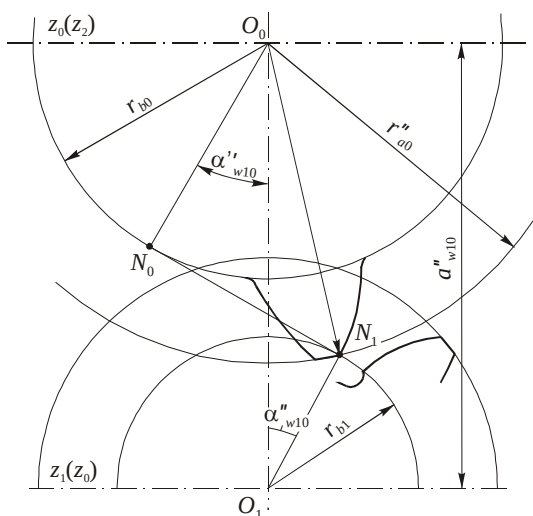


Рис. 10.43. Расчетная схема для вывода условий отсутствия подреза ножки (при $z_0 > z_1$) или среза головки зуба (при $z_2 > z_0$)

Исходное расстояние A_c также имеет ограничение, а именно с увеличением отрицательного смещения возникает опасность подреза ножки или среза головки зуба нарезаемого колеса. В первом случае снижается прочность зубьев колеса, во втором хотя и улучшается плавность зацепления, но сокращается площадь боковой поверхности зуба и возрастает интенсивность ее износа.

Подрез ножки

имеет место при нарезании долбяком с большим числом зубьев ($z_0 > 30$) колес с малым числом зубьев, когда радиус окружности выступов долбяка r''_{a0} будет больше радиуса O_0N_1 окружности, проходящей через последнюю точку N_1 линии зацепления N_0N_1 (рис. 10.43). Следовательно, условие отсутствия подреза ножки можно записать так:

$$r''_{a0} \leq O_0N_1.$$

Из рис. 10.43 следует, что

$$O_0N_1 = \sqrt{(N_0N_1)^2 + r_{b0}^2}.$$

Так как $N_0N_1 = a''_{w10} \sin \alpha''_{w10}$ (10.18), то условие отсутствия подреза ножки зуба примет вид

$$r''_{a0} \leq \sqrt{(a''_{w10} \sin \alpha''_{w10})^2 + r_{b0}^2}. \quad (10.77)$$

Если поменять местами колесо z_2 и долбяк z_0 и если при этом $z_2 \geq z_0$, то колесо будет пытаться подрезать ножку зуба долбяка. Однако это невозможно, и долбяк ножками своих зубьев будет срезать металл на головках зубьев колеса, т.е. будет иметь место срез головки зубьев колеса.

По аналогии с (10.77), поменяв индекс 0 на индекс 2, можно записать условие отсутствия среза головки зуба колеса:

$$r_{a2} \leq \sqrt{(a''_{w20} \sin \alpha''_{w20})^2 + r_{b2}^2}. \quad (10.78)$$

Проверку неравенств (10.77) и (10.78) проводят при максимальной абсолютной величине отрицательного смещения $|-x_0m|$, которую находят обычно так: назначают полную высоту долбяка B из рекомендаций стандарта (ГОСТ 9323–79) или условия шлифования боковой поверхности зубьев долбяка [21, табл.2]. При этом из рис. 10.32

$$B = A + A_e + e,$$

где e – длина зуба окончательно сточенного долбяка ($e = (1/3 - 1/4)B$, но не менее 4 мм).

Тогда

$$A_e = B - e = \frac{|-x_0m|}{\operatorname{tg} \alpha_g},$$

а допустимое отрицательное смещение профиля

$$|-x_0| = (B - e) \operatorname{tg} \alpha_b / m.$$

Найденное значение коэффициента смещения $|-x_0|$ проверяют на отсутствие подреза ножки и среза головки зуба по уравнениям (10.77) и (10.78). Оно входит в параметры: r_{a0}'' , a_{w10}'' , α_{w10}'' , r_{a2} , a_{w20}'' , α_{w20}'' .

Если неравенства нарушаются, то необходимо:

- уменьшить абсолютное значение отрицательного смещения $|-x_0|$;
- уменьшить z_0 (при подрезе ножки) в уравнении (10.77);
- увеличить z_0 (при срезе головки) в уравнении (10.78);
- изменить x_1 и x_2 при нарезании корригированных колес.

При этом надо иметь в виду, что уменьшение z_0 связано с опасностью появления интерференции, и брать такое значение z_0 , чтобы этого не допустить.

О выборе числа зубьев долбяка. Во всех вышеприведенных расчетах одним из важнейших параметров является число зубьев долбяка z_0 . Выбор z_0 зависит от модуля, габаритных размеров заготовки (диаметр и ширина зубчатого венца колеса), номинального делительного диаметра зубодолбежного станка.

Для основных типов долбяков с модулем $m = 0,2 \dots 50,0$ мм установлены следующие ряды номинальных диаметров:

дисковые долбяки – 75; 100; 125; 160; 200 мм;

чашечные долбяки – 50; 75; 100; 125 мм;

хвостовые долбяки ($m = 1 \dots 4$ мм) – 25,38 мм.

Каждый номинальный делительный диаметр $d_{0н}$ станка охватывает определенный диапазон модулей, который приводится в паспорте станка. Там же указаны наибольшие допустимые размеры заготовки. Фактические делительные диаметры обычно отличаются от номинальных, так как требуется соблюдать соотношение $d_0 = mz_0$, где z_0 – целое число. Однако это отличие должно быть минимальным, а z_0 из технологических соображений необходимо брать четным.

Наибольшее применение на практике получили долбяки с $d_{0н} = 75 \dots 100$ мм при $z_0 = 15 \dots 75$. Они позволяют нарезать колеса внешнего зацепления с малыми значениями высот переходных кривых.

Выше было показано, что чем больше z_0 , тем выше стойкость долбяка, больше запас на переточку и меньше величина погрешности при зубонарезании. Однако при нарезании колес с внутренним зацеплением из-за ограничений по диаметру долбяка приходится применять долбяки

с $z_0 < 15$. У этих долбяков увеличена высота переходных кривых, так как радиус основной окружности становится больше радиуса окружности впадин. При этом возрастает опасность появления интерференции нарезаемых колес. Поэтому такие долбяки имеют малые исходные расстояния и, соответственно, малый запас на переточку. При нарезании крупномодульных колес ($m > 5$ мм) силовых передач z_0 увеличивают до 120.

Таким образом, в начале проектирования долбяка необходимо подобрать модель станка по модулю и габаритным размерам заготовки, а затем по номинальному делительному диаметру станка определить число зубьев долбяка. Остальные параметры долбяка находятся по уравнениям, приведенным выше.

10.5. Шеверы

Это инструменты высокой точности, предназначенные для чистовой обработки зубчатых колес. Процесс шевингования заключается в том, что при сцеплении инструмента с обрабатываемым колесом из-за несовпадения углов наклона зубьев у шевера и колеса при взаимном обкате происходит их скольжение. На боковых сторонах зубьев шеверов имеются стружечные канавки, которые образуют режущие кромки и пространство для размещения стружки. В процессе скольжения с боковых сторон зубьев колеса режущие кромки канавок шевера срезают тонкие волосяные стружки (от англ. shave – строгать, скоблить).

Шевингование повышает точность колес примерно на одну степень. При этом исправляются профиль зубьев, шаг, частично погрешности направления зубьев, снижается биение зубчатого венца и особенно шероховатость боковых поверхностей (от $Ra\ 3 \dots 2,5$ до $Ra\ 0,63 \dots 0,32$ мкм). Шеверы применяются для обработки цилиндрических колес $m = 0,2 \dots 8,0$ мм с прямыми и винтовыми зубьями, с твердостью до $HRC_{\text{э}}\ 35$, главным образом с целью повышения плавности зубчатого зацепления.

Типы шеверов и кинематика процесса шевингования. Шеверы бывают трех типов: червячные, реечные и дисковые.

Червячные шеверы (рис. 10.44, а) применяются для обработки червячных колес и представляют собой червяк, подобный по размерам рабочему червяку с нанесенными на боковых сторонах витков канавками. Канавки наносят в радиальном направлении или под углом $7 \dots 10^\circ$. У основания витков червяка делается винтовая канавка для выхода долбежного резца, формирующего режущие кромки шевера. Кинематика движения шевера подобна работе рабочего червяка в зацеплении с чер-

вячным колесом. Стружки снимаются за счет проскальзывания витков червяка по боковым сторонам зубьев колеса.

Реечные шеверы (рис. 10.44, б) предназначены для обработки цилиндрических колес с прямыми и винтовыми зубьями. Они изготавливаются сборными из отдельных зубьев рейки, насаженных на штангу и закрепленных с торцов планками. Для обработки прямозубых колес применяют косозубые рейки, а для косозубых колес – прямозубые рейки. На боковых сторонах зубьев рейки наносят прямоугольные канавки, нормальные к направлению зубьев.

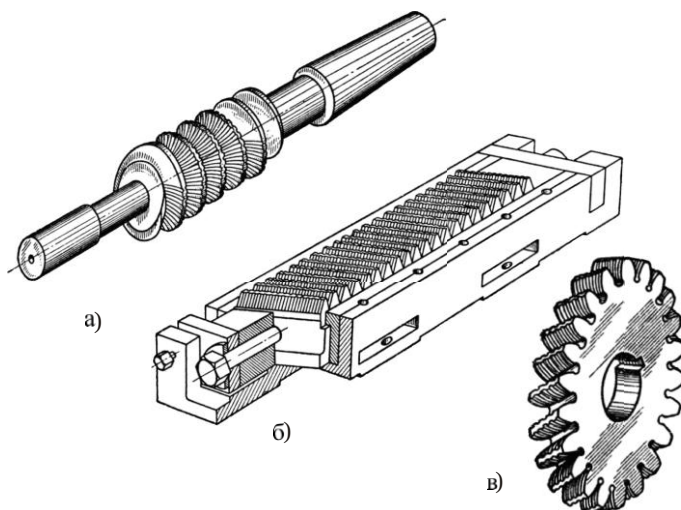


Рис. 10.44. Типы шеверов: а – червячный шевер; б – реечный; в – дисковый

В процессе шевингования шевер-рейка устанавливается на столе станка (рис. 10.45, а) и совершает возвратно-поступательное движение. Обрабатываемое колесо, находящееся в зацеплении с шевером, устанавливается в центрах и принудительно удерживается в плоскости траектории движения стола. Если бы оно могло свободно перекатываться по рейке, то заняло бы положение 2. Однако в процессе обработки колеса оно из положения 1 переходит в положение 3, т.е. создается движение скольжения зубьев шевера относительно зубьев колеса. При этом происходит процесс резания.

Из рис. 10.45, а следует, что

$$\bar{v}_{\text{ск}} + \bar{v}_1 = \bar{v}_0; , \quad v_{\text{ск}} = v_0 \sin \beta_0, \quad (10.79)$$

где $v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения (резания); v_1 – окружная скорость колеса; v_0 – скорость перемещения шевра; β_0 – угол наклона зубьев шевра.

Длина шевра-рейки L_0 должна быть такой, чтобы за время перемещения стола в одну сторону все зубья колеса контактировали бы с зубьями шевра. Отсюда

$$L_0 = \frac{\pi d_1}{\cos \beta_0} + 2P_{x0},$$

где d_1 – диаметр делительной окружности колеса; P_{x0} – осевой шаг рейки; $2P_{x0}$ – длина перебега.

Следует отметить, что изготовление зубьев шевра-рейки и ее монтаж очень сложны и трудоемки, а при сборке неизбежны потери точности. Поэтому данный инструмент не получил широкого распространения. На практике шевингование цилиндрических колес производится преимущественно дисковыми шеверами, расчет которых будет дан ниже.

Дисковый шеввер (рис. 10.44, в) представляет собой колесо, изготовленное из инструментальных материалов с высокой степенью точности. На боковых сторонах его зубьев, как и у других типов шеверов, путем долбления сформированы стружечные канавки, которые образуют режущие кромки при пересечении с боковыми эвольвентными поверхностями зубьев и создают пространство для размещения стружки. Канавки несквозные, за исключением шеверов для мелко модульных колес ($m = 0,2 \dots 0,9$ мм), у которых они перерезают зуб насквозь из-за малых размеров зубьев.

Для осуществления процесса скольжения (резания) угол наклона зубьев шевра к оси делается отличающимся от угла наклона зубьев обрабатываемых колес. Таким образом, колесо и шеввер в зацеплении представляют собой передачу со скрещивающимися осями в пространстве (рис. 10.45, б, в). Для обработки прямозубых колес обычно применяют шеввер с винтовыми правозаходными зубьями, для обработки косозубых колес – или прямозубый шеввер, если $\beta_1 = 10 \dots 15^\circ$, или же косозубый, но с углом наклона зубьев, отличающимся от угла наклона зубьев обрабатываемого колеса.

Угол скрещивания осей шевра и колеса в общем случае равен

$$\Sigma = \beta_0 \pm \beta_1, \quad (10.80)$$

где β_0, β_1 – углы наклона зубьев соответственно шевера и колеса (знак «–» для разноименного направления зубьев, а знак «+» – для одноименного).

Для косозубых правозаходных колес обычно применяют левозаходный шевер, для левозаходных колес – правозаходный шевер.

При обработке прямозубого колеса (рис. 10.45, б) скорость скольжения (резания) равна

$$v_{ск} = v_0 \sin \Sigma, \quad (10.81)$$

где v_0 – скорость вращения шевера; Σ – угол скрещивания ($\Sigma = \beta_0$).

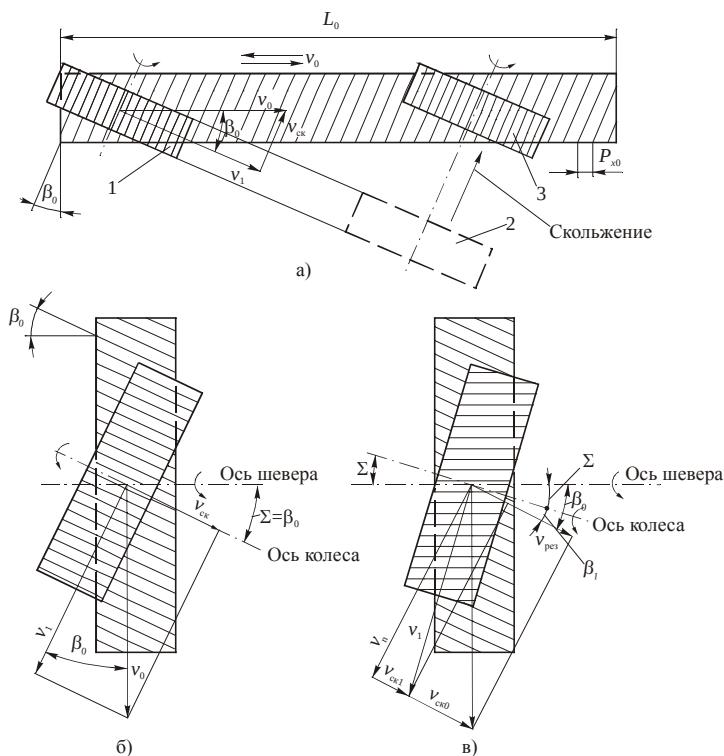


Рис. 10.45. Принципы работы шевера: а – зацепление косозубого шевера-рейки с прямозубым колесом; б – зацепление дискового косозубого шевера с прямозубым колесом; в – зацепление косозубого колеса с косозубым шевером

При обработке косозубого колеса косозубым шевером (рис. 10.45, в):

- окружная скорость колеса $v_1 = v_0 \cos \Sigma$;
- скорость нормальная к зубу колеса и шевера в момент их контакта $v_n = v_0 \cos \beta_0$;
- скорость вдоль зуба шевера $v_{ck0} = v_0 \sin \beta_0$;
- скорость вдоль зуба колеса $v_{ck1} = v_1 \sin \beta_1$;
- скорость скольжения зубьев шевера относительно зубьев колеса, т.е. скорость резания:

$$v_{рез} = v_{ck0} \pm v_{ck1}. \quad (10.82)$$

Здесь также знак «+» ставится при одноименном, а знак «-» – при разноименном направлениях винтовых зубьев инструмента и колеса (скорости скольжения v_{ck0} и v_{ck1} нормальны к v_n).

Контакт зубьев шевера и колеса теоретически точечный, а фактически имеет место зона (пятно) контакта вследствие упругих деформаций от нормального давления (рис. 10.46). Зона контакта в процессе обката перемещается по пространственной линии зацепления и именно по ней срезается стружка. Для возможности обработки профиля зубьев колеса по всей поверхности зуба необходимо задать шевру продольную и радиальную подачи.

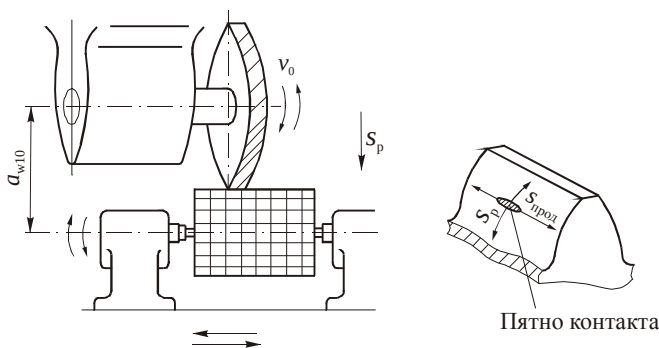


Рис. 10.46. Установка на станке шевера и обрабатываемого колеса

Скорость скольжения при обработке прямозубых колес шевром, как следует из равенства (10.81), пропорциональна $\sin \Sigma$ – углу скрещивания их осей. Она же совпадает по величине со скоростью резания. С точки зрения повышения производительности угол Σ следовало бы

брать по возможности большим. Однако при этом уменьшается пятно контакта, ухудшается качество обработанной поверхности и уменьшается исправляемость зубьев колеса по направлению. Поэтому обычно принимают $\Sigma = 15^\circ$, а при обработке колес блочных или с фланцем снижают Σ до 5° для возможности прохода шевера по всей длине обрабатываемого зуба. Допустимые пределы изменения $\Sigma = 3 \dots 20^\circ$.

При шевинговании инструмент и обрабатываемое колесо находятся в беззазорном зацеплении. Вращение сообщается шевру от привода станка, а колесо свободно вращается в центрах (рис. 10.46). Продольная подача $s_{пр}$ осуществляется столом станка, на котором установлено колесо. После каждого прохода колеса направление подачи изменяется на обратное. Направление вращения шевера может также изменяться, но иногда обработка ведется без реверсирования. Для обработки зуба по всей высоте после каждого двойного хода стола производится радиальная подача s_p в направлении сближения осей шевера и колеса. Например, при обработке стальных колес шевром из быстрорежущей стали скорость вращения шевера $v_0 = 100 \dots 120$ м/мин, $v_{рез} = 35 \dots 45$ м/мин, $s_{пр} = 0,1 \dots 0,15$ мм/об, $s_p = 0,02 \dots 0,04$ мм/дв.ход. Припуск под шевингование $\delta = 0,035m$.

Дисковые шевры проектируются или для обработки колес одного числа зубьев, или для колес одного модуля, но с разным числом зубьев. Для последнего случая шевры общего назначения стандартизированы (ГОСТ 8570–80). Они обычно применяются в мелкосерийном или единичном производстве. Номинальные делительные диаметры и углы наклона зубьев: для $m = 1 \dots 1,5$ мм $d_0 = 85$ мм, $\beta_0 = 10^\circ$; для $m = 1,25 \dots 6,0$ мм $d_0 = 180$ мм, $\beta_0 = 5^\circ$ и 15° ; для $m = 2 \dots 8$ мм $d_0 = 240$ мм, $\beta_0 = 5^\circ$ и 15° . Для мелко модульных колес с $m = 0,2 \dots 0,9$ мм, $d_0 = 85$ мм, $\beta_0 = 10^\circ$.

В массовом производстве проектируются специальные шевры, т.е. только для обработки колес определенного размера.

Шевры обычно изготавливаются из быстрорежущих сталей марок Р6М5, Р6М5К5, Р18. Для обработки колес с твердостью $HRC_{35} \dots 48$ и выше шевры оснащают твердосплавными пластинами. Иногда применяют покрытия зубьев шевера композитами из кубического нитрида бора.

Конструктивные параметры дисковых шевров для обработки прямозубых колес. При сцеплении шевера с обрабатываемым колесом образуется пара колес со скрещивающимися в пространстве осями и с разными углами наклона зубьев относительно своей оси.

Для правильного сцепления таких колес, как следует из теории зацепления, они должны иметь правильное зацепление с одной и той же исходной рейкой. Поэтому у сопряженных колес должны быть равны модули, углы профиля и шаги в **нормальном сечении**, т.е. соответственно $m_{n0} = m_1$, $\alpha_{n0} = \alpha_1$, $P_{n0} = P_1$. Угол скрещивания определяется по уравнению (10.80), из которого следует, что угол наклона зубьев шевера для прямозубых колес равен $\beta_0 = \Sigma$, так как $\beta_1 = 0^\circ$.

Многие параметры шевера удобнее контролировать в **торцевом сечении**. Их можно найти пересчетом путем деления значений параметров в нормальном сечении на $\cos \beta_0$. Таким образом, в торцевом сечении

$$m_{t0} = m_1 / \cos \beta_0; \quad \operatorname{tg} \alpha_{t0} = \operatorname{tg} \alpha_1 / \cos \beta_0; \quad P_{t0} = P_1 / \cos \beta_0. \quad (10.83)$$

Диаметр делительной окружности шевера

$$d_0 = m_{t0} z_0 \quad (10.84)$$

принимается с учетом ограничений по станку:

1) $d_0 \leq d_{a0 \text{ ст}}^{\max} - (3 \dots 4)m$, где $d_{a0 \text{ ст}}^{\max}$ – максимальный диаметр окружности выступов шевера, допускаемый конструкцией станка;

2) $0,5(d_0 + d_1^{\min}) \geq a_{w10}^{\min}$, где $a_{w10}^{\min}$ – наименьшее допустимое межцентровое расстояние между шеве́ром и колесом при обработке колеса с наименьшим диаметром делительной окружности – $d_1^{\min}$.

Найденное из уравнения (10.84) значение числа зубьев шевера $z_0 = d_0 / m_{t0}$ уточняется из условий точности и качества обработанной поверхности зубьев колеса. Оно не должно быть кратным числу зубьев колеса z_1 или иметь с ним общие сомножители. Обычно z_0 округляют до ближайшего из ряда простых чисел, например: 29, 31, 37, 41, 43 и т.д. При этом через каждый оборот во впадине зуба колеса будет находиться иной зуб шевера, что обеспечивает повышение качества обработанных поверхностей зубьев колеса.

Диаметр основной окружности рассчитывается по формуле

$$d_{b0} = m_t z_0 \cos \alpha_{t0}. \quad (10.85)$$

Диаметр посадочного отверстия шевера принимают по диаметру шпинделя станка. Для стандартных шеверов $d_{\text{отв}} = 31,75$ мм у шеверов с $d_0 = 85$ мм и $d_{\text{отв}} = 63,5$ мм – для шеверов с $d_0 = 180$ и 250 мм.

Ширина венца шевера В должна быть не менее проекции длины активной части линии зацепления пары «шевер – колесо» на нормаль к

линии, соединяющей их центры. Обычно она невелика. Поэтому с целью повышения жесткости инструмента и качества обработки ее несколько увеличивают. Так, для стандартных шеверов $B = 15, 20, 25$ мм, соответственно для $d_0 = 85, 180, 250$ мм.

Размеры и форма зубьев шевера. Зубья шевера имеют только эвольвентный профиль без переходных кривых. У основания зубьев сверлятся отверстия для выхода долбежных гребенок, применяемых для образования стружечных канавок. Зубья шевера также должны обрабатывать только эвольвентные участки зубьев колеса и не касаться окружности выступов зубьев колеса и переходной кривой у основания зубьев.

Номинальная толщина зуба шевера в нормальном сечении должна быть равна

$$S_{n0} = \pi m - S_{1,2}, \quad (10.86)$$

где $S_{1,2}$ – толщины зубьев обрабатываемых колес z_1 и z_2 с учетом утонения для образования бокового зазора.

Номинальная высота головки зуба шевера принимается

$$h_{a0} = 1,1m \quad (10.87)$$

при обработке колес с высотой ножки $h_{f1} = h_{f2} = 1,25m$.

После затупления шевер перетачивается путем шлифования зубьев по боковым сторонам и наружному диаметру со снятием слоя толщиной $0,05 \dots 0,07$ мм. Рекомендуется проводить не менее трех-четырех переточек.

Для создания припуска на переточку зубья шевера делаются **корригированными**, причем смещение профиля дается в «плюс» и «минус» от номинального (рис. 10.47). Припуск по толщине на сторону $\Delta = (a+b)$ принимается для шеверов $m = 2 \dots 8$ мм в зависимости от модуля в пределах $\Delta = 0,25 \dots 0,4$ мм. Распределение припуска относительно номинального профиля может быть симметричным (т.е. $a = b = \Delta/2$), несимметричным или даже полностью смещенным в сторону положительной или отрицательной коррекций. В начале расчета он обычно задается симметричным, а затем как сама величина припуска, так и его распределение уточняются при расчете шевера.

Для нового шевера

- толщина зуба на делительном цилиндре

$$S'_{n0} = S_{n0} + 2a = (\pi m - S_{1,2}) + 2a; \quad (10.88)$$

- высота головки зуба

$$h'_{a0} = h_{a0} + a \operatorname{ctg} \alpha_0 = 1,1m + a \operatorname{ctg} \alpha_0 ; \quad (10.89)$$

- диаметр окружности выступов

$$d'_{a0} = d_0 + 2h'_{a0} . \quad (10.90)$$

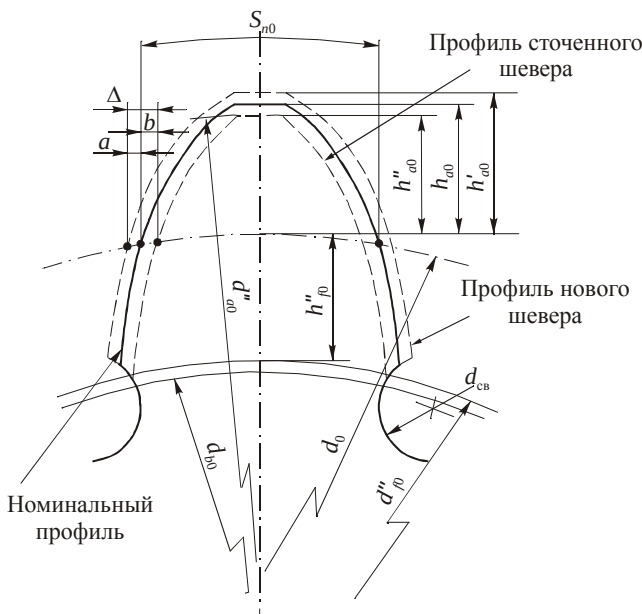


Рис. 10.47. Распределение припуска на переточку зубьев шевра

Для сточенного шевра

- толщина зуба

$$S''_{n0} = S_{n0} - 2b = (\pi m - S_{1,2}) - 2b ; \quad (10.91)$$

- высота головки зуба

$$h''_{a0} = h_{a0} - b \operatorname{ctg} \alpha_0 = 1,1m - b \operatorname{ctg} \alpha_0 ; \quad (10.92)$$

- диаметр окружности выступов

$$d''_{a0} = d_0 + 2h''_{a0} ; \quad (10.93)$$

- высота ножки

$$h''_{f0} = h_{a1,2} + b \operatorname{ctg} \alpha_0 + \delta, \quad (10.94)$$

где δ – запас на величину возможного увода сверла при сверлении отверстия у основания зуба шевера ($\delta = 0,35 \dots 1,0$ мм в зависимости от модуля);

- диаметр окружности впадин

$$d''_{f0} = d_0 - 2h''_{f0};$$

- диаметр сверла для сверления отверстия у основания зуба шевера

$$d_{\text{св}} \cong m.$$

Режущие кромки и стружечные канавки шевера.

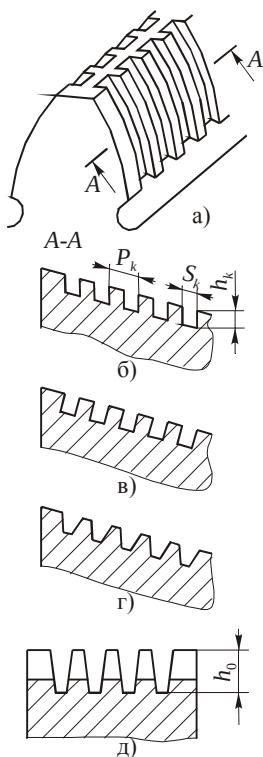


Рис. 10.48. Формы стружечных канавок шевера

Режущие кромки зубьев шевера образуются при пересечении стружечных канавок с боковыми эвольвентными поверхностями зубьев (рис. 10.48, *а*). У шеверов $m = 2 \dots 8$ мм канавки имеют следующие формы: прямоугольные со сторонами, параллельными торцу (рис. 10.48, *б*), или нормальными к направлению зуба (рис. 10.48, *в*) и трапецидальные (рис. 10.48, *г*). У мелко модульных шеверов ($m = 0,3 \dots 2,0$ мм) из-за малых размеров зубьев канавки делаются сквозными прямоугольными или трапецидальными (рис. 10.48, *д*).

Режущие кромки шевера в статике имеют нулевой задний угол, но в сцеплении шевера с колесом появляется кинематический угол. Это видно из рис. 10.49, *а*, на котором приведена развертка сечения зубьев шевера и колеса делительным цилиндром колеса и указано направление перемещения зуба шевера S во впадине колеса.

Передний угол зависит от формы канавки и направления подачи. Если канавки прямоугольные, со сторонами, параллельными торцу, то передний угол имеет или положительное, или отрицательное значение в зависимости от направления подачи. У канавок, нормальных к направлению зуба, $\gamma = 0^\circ$ независимо от направления подачи.

Размеры канавок должны быть достаточными для размещения стружек как у новых, так и у переточенных шеверов. Для стандартных шеверов ($m = 2 \dots 8$ мм) шаг канавок $P_k = 1,8 \dots 2,4$ мм, глубина $h_k = 0,6 \dots 1,0$ мм, ширина $S_k = 0,5P_k$ (рис. 10.48).

Основные элементы расчета шевера. Расчет шевера достаточно сложен, особенно предназначенного для обработки косозубых колес. Кроме назначения основных параметров по уравнениям, приведенным выше, проводят ряд проверочных расчетов, определяющих возможность эксплуатации шевера и правильность зацепления обработанных им колес (z_1 и z_2).

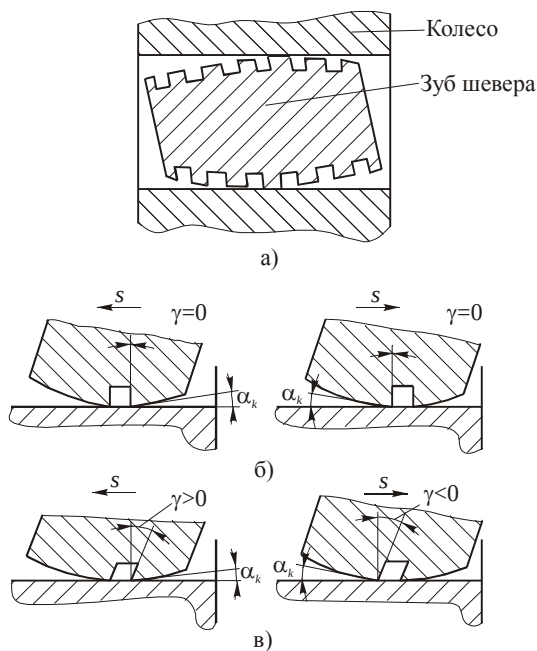


Рис. 10.49. Контакт зубьев шевера и колеса: а – развертка сечения зуба шевера делительным цилиндром во впадине зуба колеса; б – передний и задний углы в случае, когда канавки перпендикулярны направлению зуба; в – канавки параллельны торцу зуба

Уточнение припуска на переточку шевера. Припуск на переточку шевера уточняют по двум условиям: 1) по положению основной окруж-

ности у сточенного шевера; 2) по допустимому заострению зуба у нового шевера.

Исходя из **первого условия**, с целью обеспечения эвольвентного профиля зубьев шевера диаметр основной окружности шевера должен быть меньше диаметра окружности впадин. Кроме того, учитывая, что участки эвольвентного профиля шевера около основной окружности обеспечивают худшее качество обработки, рабочая часть профиля зуба **сточенного шевера** не должна доходить до основной окружности на 1...2 мм. Поэтому должно быть выдержано следующее условие:

$$d''_{f0} \geq d_{b0} + 2\text{мм}, \quad (10.95)$$

где d''_{f0} – минимальный диаметр окружности впадин сточенного шевера (см. формулу (10.94)); d_{b0} – диаметр основной окружности (см. формулу (10.85)) (рис. 10.47).

Если условие (10.95) не выполняется, то вводится дополнительное высотное корригирование зубьев шевера на величину

$$y = (d_{b0} - d''_{f0}) + 1 \text{ мм}. \quad (10.96)$$

При этом увеличивается высота головки зуба и уменьшается высота ножки на эту же величину. После этого производят перераспределение припуска на переточку шевера и вновь определяют его исполнительные размеры. Корригированные размеры подсчитываются по формулам:

$$\begin{cases} S'_0 = S'_{n0} + 2y \operatorname{tg} \alpha_0; \\ h''_{f0k} = h''_{f0} - y; \\ d''_{f0k} = d_0 - 2h''_k. \end{cases} \quad (10.97)$$

Здесь S'_{n0} определяют по уравнению (10.88), h''_{f0} – по (10.94), d_0 – по (10.84).

По второму условию во избежание ослабления вершины зуба шевера между канавками на боковых сторонах у нового шевера должна оставаться перемычка P , которая с увеличением положительной высотной коррекции уменьшается из-за уменьшения толщины зуба по вершине (рис. 10.50).

Величина P проверяется по соотношению

$$P = S_{ta0} - 2h_k / \cos \alpha_{ta0} \geq 0,1\text{мм}, \quad (10.98)$$

где α_{ta0} – угол профиля зуба шевера на окружности выступов, определяемой по известному соотношению: $\cos \alpha_{ta0} = r_{b0} / r_{a0}$; S_{ta0} – толщина зуба на окружности выступов.

Как было показано выше, толщина зуба на любой окружности может быть определена по уравнению (10.10), т.е.

$$S_{ta0} = d_{a0}^{\max} (S_{t0} / d_0 + \operatorname{inv} \alpha_{t0} - \operatorname{inv} \alpha_{ta0}).$$

Если окажется, что $P < 0,1$ мм, то следует изменить расположение припуска на переточку относительно номинального профиля: увеличить припуск b или уменьшить a или же в крайнем случае уменьшить глубину канавок h_k (рис. 10.47 и 10.50).

Проверка шевера на правильность зацепления обработанных колес (z_1 и z_2). Так как зубья шевера корригированы, то необходимо провести проверку шевера на полноту обработки боковых поверхностей зубьев колес z_1 и z_2 , находящихся в зацеплении. Нормальная работа зацепления будет обеспечена, если активная часть профиля зубьев колес будет меньше активной части зуба колеса при зацеплении с шеве́ром в процессе обработки, т.е. $eK_{12} \leq eK_{10}$ (рис. 10.51, б). Отсюда необходимо, чтобы радиус окружности, проходящей через крайнюю точку контакта зубьев колес, был равен

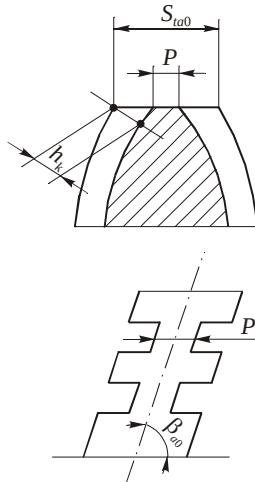


Рис. 10.50. Допустимое P заострение зуба шевера

$$r_{K12} \geq r_{K10}, \quad (10.99)$$

где r_{K10} – радиус окружности, проходящей через крайнюю точку контакта колеса z_1 и шевера.

Проверка шевера по условию (10.99) подобна проверке долбяка на отсутствие интерференции.

Существует два метода проверки шевера:

1. Упрощенный, основанный на схеме сечения шевера в зацеплении с колесом плоскостью, нормальной к оси колеса.

2. Пространственный, на основе схемы пространственного зацепления шевера с колесом, как пары колес с пересекающимися осями. Способ разработан В.Ф. Романовым [21].

Рассмотрим первый, наиболее простой метод расчета применительно к обработке прямозубых колес косозубым шевером. Схема расчета представлена на рис 10.51.

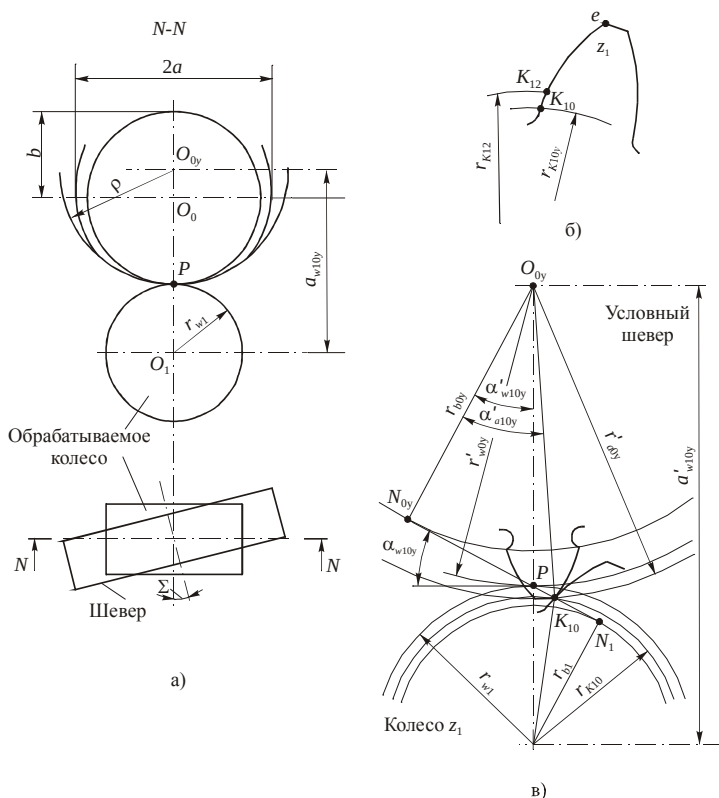


Рис. 10.51. Схема расчета шевера: a – нормальное сечение $N-N$ и условный шевер; $б$ – eK_{12} – рабочий участок зуба колеса z_1 при сцеплении с колесом z_2 , eK_{10} – участок, обработанный шевером; $в$ – схема определения радиуса r_{K10}

При сечении шевера и колеса плоскостью $N-N$ получим центроиды (начальные окружности): у колеса – окружность радиуса r_{w1} , а у шевера – эллипс с малой осью $2b = d_0$ и большой осью $2a = d_0 / \cos \beta_0$. Область

зацепления колеса и шевера находится около полюса зацепления P . Радиус кривизны эллипса в точке P равен

$$\rho = a^2 / b = d_0 / 2 \cos^2 \beta_0. \quad (10.100)$$

Здесь d_0 находят по уравнению (10.84).

Для определения условий зацепления шевера и колеса заменяем действительный шеввер **условным** с радиусом делительной окружности, равным радиусу кривизны эллипса в точке P , т.е. принимаем $r_{0y} = \rho$.

При этом радиус основной окружности $r_{b0y} = \frac{mz_{0y}}{2} \cos \alpha$. Аналогично пересчитываем радиусы условных начальных окружностей у нового и сточенного шевверов r'_{w0y} и r''_{w0y} .

Число зубьев условного шеввера равно

$$z_{0y} = d_{0y} / m = 2\rho / m. \quad (10.101)$$

Оно может быть и дробным, так как эта величина условная.

Радиус последней точки профиля зуба колеса, правильно обработанной условным шеввером, определяется из рис. 10.51, в по аналогии с дольком (см. выражение (10.73)) (рис. 10.42):

$$r_{k10y} = \sqrt{r_{b1}^2 + (a'_{w10y} \sin \alpha'_{w10y} - r_{b0y} \operatorname{tg} \alpha'_{a0y})^2}. \quad (10.102)$$

Здесь точка K_{10} находится в месте пересечения линии зацепления с окружностью выступов условного шеввера и является, таким образом, последней точкой контакта зубьев шеввера и колеса. Межцентровое расстояние между осями условного нового шеввера и колеса по аналогии с уравнением для нового долька и колеса имеет вид

$$a'_{w10y} = r'_{w0y} + r_{w1} = \frac{m(z_{0y} + z_1)}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha'_{w10y}}. \quad (10.103)$$

Угол зацепления условного нового шеввера и колеса также по аналогии с уравнениями (10.16) и (10.73) может быть записан в следующем виде:

$$\operatorname{inv} \alpha_{w10y} = \operatorname{inv} \alpha_0 + \frac{\Delta}{m(z_{0y} + z_1)}.$$

Нетрудно доказать, что коэффициент смещения профиля нового шеввера равен $x_0 = \frac{\Delta \operatorname{tg} \alpha_0}{2m}$ (рис. 10.47).

Радиус точки контакта K_{12} для z_1 и z_2 определяется по уравнению, аналогичному (10.102), т.е.

$$r_{k12} = \sqrt{r_{b1}^2 + (a_{w12} \sin \alpha_{w12} - r_{b2} \operatorname{tg} \alpha_{a2})^2}. \quad (10.104)$$

Затем проверяется неравенство (10.99). Если оно не выдерживается, то необходимо изменить величины исходных параметров шевра и прежде всего величину припуска на переточку, а затем провести новый расчет до получения удовлетворительных результатов. Указанная проверка производится для нового и окончательно сточенного шевра.

Проверка шевра на отсутствие врезания в переходную кривую зуба колеса. По мере переточки шевра приходится уменьшать межцентровое расстояние между шевром и колесом. Может наступить опасность врезания зуба шевра в переходную кривую профиля зуба колеса.

Из исходного контура зубчатой рейки следует, что наибольшая величина переходной кривой должна быть равна радиальному зазору $c = 0,25$ (0,3) m .

При шевинговании изношенным шевром необходимо соблюдать условие: $c_{01} \geq 0,60$ мм, где c_{01} – радиальный зазор между головкой зуба шевра и окружностью впадин зуба колеса.

Проверка шевра по коэффициенту перекрытия. Как указывалось выше, при шевинговании колеса шевр находится с ним в свободном зацеплении и ведет его в процессе обработки. Процесс резания возможен, если коэффициент перекрытия в зацеплении $\varepsilon > 1,1$. Для лучшей исправляемости шага колеса желательно, чтобы коэффициент перекрытия был в пределах $\varepsilon = 1,5 \dots 1,8$. При зацеплении шевра с колесом

$$\varepsilon = g_{\alpha 10} / \pi m \cos \alpha_0 \geq 1,1, \quad (10.105)$$

где $g_{\alpha 10}$ – длина активной части линии зацепления.

Длина активной части линии зацепления пары «шевр – колесо» по аналогии с уравнением (10.18) равна

$$g_{\alpha 10} = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a0}^2 - r_{b0}^2} - a_{w10} \sin \alpha_{w10}.$$

Если неравенство (10.105) не выдерживается, то необходимо изменить высоту головки зуба шевра, величину и распределение припуска на переточку.

При нарезании колес под шевингование у инструментов (червячная фреза, долбяк) профиль зубьев делают таким, чтобы обеспечить благоприятные условия работы зубьев шевра. Скорость скольжения, а следовательно, и скорость резания по высоте зуба шевра неодинаковы. Так как на вершине зуба она практически равна нулю, то вершинную кромку, контактирующую с основанием зуба колеса, желательно раз-

грузить или вообще исключить из процесса резания. Процесс обработки боковых сторон зуба колеса также облегчается, если припуск на вершине зуба колеса будет равен нулю.

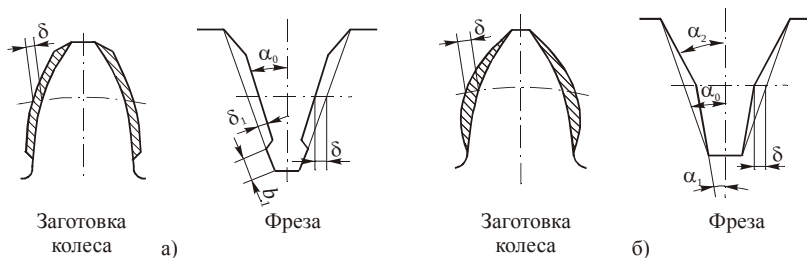


Рис. 10.52. Припуск под шевингование и формы зубьев инструментов для нарезания зубьев колес под шевингование червячной фрезы: *a* – равномерный припуск; *б* – неравномерный припуск

Благоприятная форма припуска зубьев колес под шевингование показана на рис. 10.52. Ее можно получить, если внести модификацию в профиль зуба червячной фрезы в виде утолщения зуба по головке и ножке. Тогда припуск под шевингование будет равен нулю на головке и ножке зуба обрабатываемого колеса. Вариант, представленный на рис. 10.52, *a*, является более предпочтительным.

10.6. Обкаточные инструменты для деталей с неэвольвентным профилем

Метод обкаточного огибания, использованный при проектировании червячных зуборезных фрез и долбляков для нарезания колес с эвольвентным профилем зубьев, используется также и для изготовления деталей типа тел вращения с зубьями (шлицами), расположенными на наружной или внутренней поверхности и имеющими различную форму профиля в сечении, перпендикулярном к оси, а также деталей с многократно повторяющимся профилем, например валов с фасонной поверхностью в осевом сечении и др.

На рис. 10.53 приведено несколько примеров профилей таких деталей, которые при обработке по методу обката являются огибающими семейства профилей режущих кромок инструмента. Практическое применение нашли следующие инструменты, работающие по методу обката

та: червячные фрезы, долбяки и обкаточные резцы. Их достоинствами являются высокая производительность и точность формы изготавливаемых деталей. К недостаткам можно отнести возможность обработки деталей только данного типоразмера и высокую стоимость инструмента. Таким образом, они являются специальными инструментами и их применение экономически оправдано только в условиях крупносерийного и массового производств.

являются высокая производительность и точность формы изготавливаемых деталей. К недостаткам можно отнести возможность обработки деталей только данного типоразмера и высокую стоимость инструмента. Таким образом, они являются специальными инструментами и их применение экономически оправдано только в условиях крупносерийного и массового производств.

В основе формирования профилей деталей этими инструментами лежит принцип обката и взаимного огибания профилей инструмента и детали при качении без скольжения их центроид. Центроидом червячных фрез (рис. 10.54, *а*) является начальная прямая H , а детали – окружность D . При обработке долбяками (рис. 10.54, *б*) центроидами являются две окружности: H и D . При точении обкаточными резцами (рис. 10.54, *в*) центроида инструмента – окружность H , а детали – прямая D , параллельная оси и касательная к профилю детали.

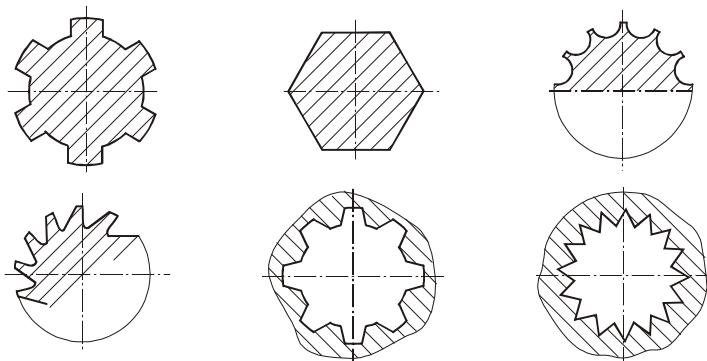


Рис. 10.53. Виды профилей в сечении, перпендикулярном оси, обрабатываемых методом обкаточного огибания

Наибольшее применение в машиностроении нашли червячные фрезы для нарезания фасонных зубьев на наружных поверхностях деталей: шлицевые валы, звездочки передач, храповые колеса и т.д.

Долбяки используются в основном для нарезания зубьев на внутренних поверхностях, а также на наружных поверхностях при работе «в упор», например при наличии фланцев или на ступенчатых деталях. По производительности долбяки уступают червячным фрезам, но более эффективны при малой длине обработки.

Обкаточные резцы применяют относительно редко: при точении длинных маложестких фасонных валиков, например различных рукояток. Кинематика такого резания показана на рис. 10.54, в, откуда следует, что для такой обработки необходим специальный или оснащенный приспособлением токарный станок.

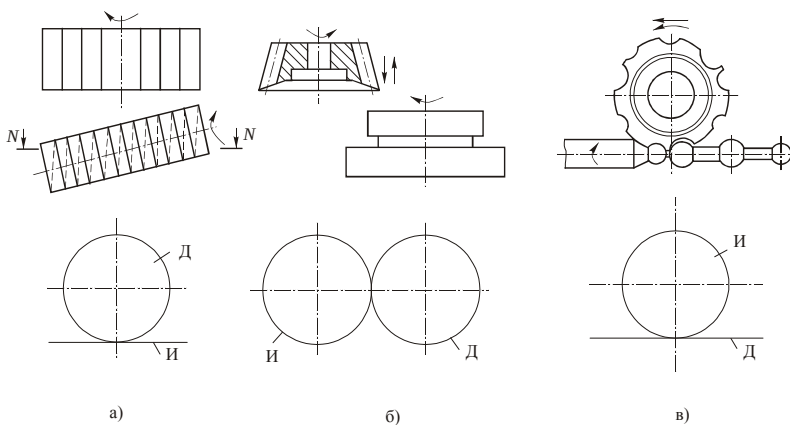


Рис. 10.54. Виды обкаточных инструментов и их центры: а – червячная фреза; б – долбяк; в – обкаточный резец

При проектировании обкаточного режущего инструмента основной задачей является профилирование режущих кромок по заданному профилю детали. При этом, прежде чем приступить к ее решению, необходимо проверить возможность получения данного профиля детали методом огибания.

Условия возможности обработки по методу огибания. Из теории сопряжения поверхностей следует, что взаимный обкат профилей возможен лишь в том случае, когда выполняются следующие условия:

1) в точках контакта сопряженные профили имеют общую касательную и нормаль к ней;

2) нормаль, проведенная через точку контакта, должна проходить через полюс зацепления P , который является точкой контакта центроид;

3) нормали к профилю детали должны пересекаться или касаться центроиды детали последовательно. На ломаных поверхностях пересечение нормалей возможно только в теле детали, а не инструмента.

Причинами, ограничивающими возможность обработки методом обката, являются:

1) невозможность построения сопряженного профиля режущей кромки инструмента в соответствии с вышеперечисленными требованиями;

2) заострение профиля зуба инструмента;

3) получение при обработке на стыке ломаного профиля переходных кривых, выходящих за пределы поля допуска на деталь.

Сказанное можно проиллюстрировать следующими примерами.

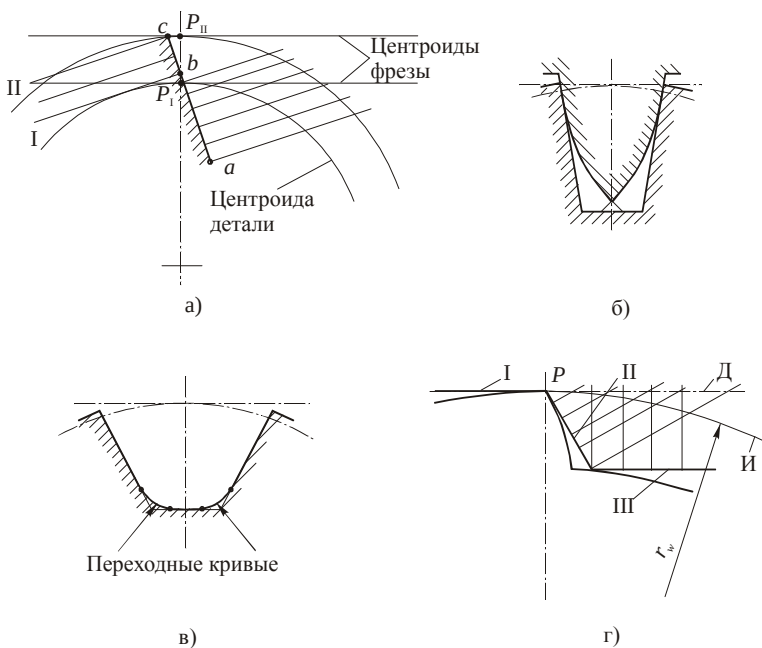


Рис. 10.55. Ограничения обработки по методу обката

На рис. 10.55, *а* центроида детали, она же начальная окружность, может занимать положения I и II относительно детали, прямолинейный профиль которой в положении I может быть обработан только на участке *ab*. Участок профиля выше точки *b* по методу огибания может быть обработан только при положении II центроида, т.е. при положении I нормали к профилю детали на участке *bc* не пересекают центроиду.

На рис. 10.55, *б* показано, что режущие кромки двух участков профиля пересекаются между собой, зуб инструмента заостряется и не может обработать деталь на требуемую глубину.

При ломаном прямолинейном профиле на стыках неизбежно образуются переходные кривые (рис. 10.55, *в*), которые уменьшают границы правильной обработки профиля. Необходимо, чтобы эти кривые не превосходили допустимых пределов по условиям эксплуатации детали.

Пример выполнения третьего условия обката приведен на рис. 10.55, *г*. Здесь центроидой инструмента – обкаточного резца – является окружность *И*, а центроидой детали – прямая *Д*. При совпадении последней с участком I детали нормали к участкам I и II последовательно пересекают центроиду *Д*, а нормали к участку III пересекаются с ними в теле детали. Следовательно, профиль I–II–III может быть полностью обработан методом обката.

Решение задачи профилирования рассмотрим на примере червячных шлиценарезных фрез, получивших наибольшее распространение на практике.

Профилирование червячных фрез при нарезании прямобочных шлицев. Из известных типов шлицев самое широкое применение нашли прямобочные шлицы с прямолинейной образующей боковой поверхности. При этом образующие двух сторон шлица параллельны и при своем продолжении касаются условной окружности в центре с радиусом, равным половине толщины шлица $b/2$. Параметрами профиля шлицевого вала в сечении, перпендикулярном его оси, являются: диаметры наружной d_a и внутренней d_f окружностей, радиус начальной окружности r_w , толщина шлица b , угол профиля $\Delta = \arcsin b / 2r_w$.

Шлицевые соединения вала и втулки технологичны в изготовлении и удобны в сборке. Они стандартизированы и делятся на две группы: 1) с посадкой по наружному диаметру d_a (рис. 10.56, *а*); 2) с посадкой по внутреннему диаметру d_f (рис. 10.56, *б*).

Для облегчения сборки на вершине шлицев снимают фаски шириной $f \times 45^\circ$. Поэтому диаметр d_w начальной окружности шлицевых валов несколько меньше диаметра d_a наружной окружности. У шлицевых соединений с посадкой по наружному диаметру у основания шлицев вала

образуются переходные кривые (галтели), которые должны размещаться в зазоре между внутренними диаметрами вала и втулки. Такие галтели недопустимы при посадке по внутреннему диаметру. Они заменяются выемками – поднутрениями у основания шлицев, которые, кроме того, служат местом выхода шлифовального круга, когда валы изготавливают термически обработанными. При этом шлифовке подвергаются внутренняя окружность и боковые стороны шлицев.

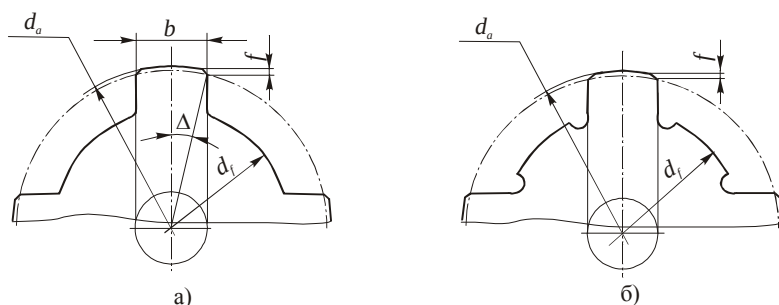


Рис. 10.56. Профили вала с прямоугольными шлицами и посадками: *a* – по наружному диаметру d_a ; *б* – по внутреннему диаметру d_i

Обычно профиль червячной фрезы в нормальном сечении $N-N$ (рис. 10.54, *a*) принимается равным профилю рейки, сопряженной с профилем детали. Хотя это приближенный метод профилирования, так как, строго говоря, зацепление имеет пространственный характер, получаемая погрешность вполне укладывается в пределы допусков на точность изготовления профиля детали. При этом следует иметь в виду, что указанная погрешность тем меньше, чем меньше угол подъема витков фрезы τ , который принимают равным не более 6° .

Известны два метода решения задачи профилирования: графический и аналитический. Первый хотя очень прост и нагляден, но дает большую погрешность даже при увеличении масштаба в 10 раз и более. Поэтому далее воспользуемся вторым, аналитическим методом.

Вначале построим графически и рассчитаем аналитически линию профилирования – зацепления инструмента и детали как геометрическое место точек их контакта в процессе обката.

На рис. 10.57 показано построение линии зацепления в соответствии с условиями обката, приведенными выше. В процессе обката начальная окружность r_w детали катится без скольжения по начальной прямой фрезы. При этом боковая сторона шлица занимает разные положения,

поворачиваясь против часовой стрелки и оставаясь касательной к условной окружности в центре. Из полюса зацепления P опустим нормали на боковую сторону шлица в разных ее положениях. Точки их пересечения C_1 , C_2 , C_3 и т.д. лежат на линии зацепления. Так как боковая сторона шлица не проходит через центр детали, то последняя (наивысшая) точка контакта A лежит несколько выше начальной окружности радиуса r_w и является, таким образом, конечной точкой прямолинейного профиля шлица и линии зацепления. Начальная точка B рабочего участка линии зацепления лежит на линии выступов зубьев фрезы, параллельной начальной прямой. Таким образом, рабочим участком линии зацепления является отрезок BPA .

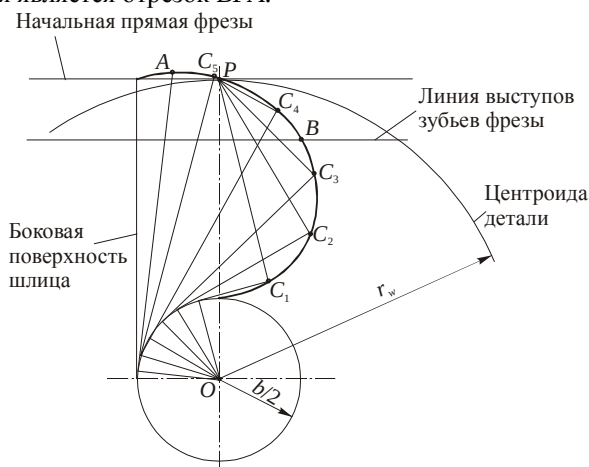


Рис. 10.57. Построение линии зацепления червячной фрезы и шлицевого вала

Для вывода уравнений линии зацепления и профиля зуба фрезы воспользуемся расчетной схемой, приведенной на рис. 10.58.

Здесь координаты осей X и Y связаны с начальной прямой фрезы, а начало координат – с полюсом P зацепления. Pe и P_1C – начальное и конечное положения боковой режущей кромки в процессе обката; кривая PC – линия зацепления; α_c – угол зацепления в точке C между нормалью PC к профилю шлица и прямой, параллельной оси X .

Характерная точка C лежит на пересечении нормали PC и линии выступов зубьев

фрезы. При обкате по часовой стрелке образующая шлица из положения PK переходит в положение AK_i , повернувшись на угол φ .

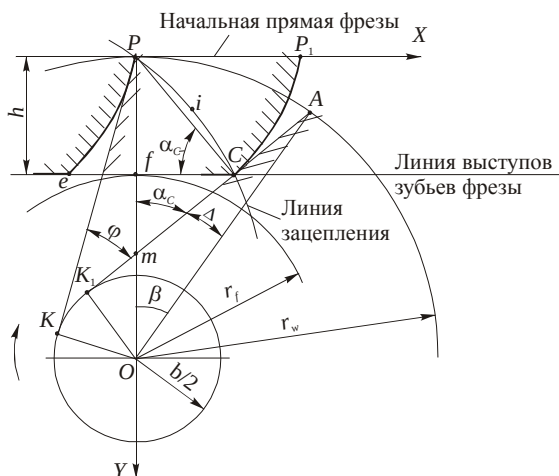


Рис. 10.58. Схема профилирования червячной фрезы для нарезания прямоугольных шлицев

Уравнение линии зацепления найдем, определив координаты точки C , принадлежащей этой кривой (рис. 10.58):

$$\begin{cases} X_c = fC = PC \cos \alpha_c; \\ Y_c = Pf = PC \sin \alpha_c. \end{cases} \quad (10.106)$$

Так как $PC = Pm \sin \alpha_c$, $Pm = r_w - Om = r_w - b/2 \sin \alpha_c$, то $PC = r_w \sin \alpha_c - b/2$.

Подставим значение PC в уравнение (10.106) и, заменив индекс точки C на i , найдем координаты любой i -й точки линии зацепления PC :

$$\begin{cases} X_i = (r_w \sin \alpha_i - b/2) \cos \alpha_i; \\ Y_i = (r_w \sin \alpha_i - b/2) \sin \alpha_i. \end{cases} \quad (10.107)$$

Здесь переменной величиной является угол зацепления α_i , задаваясь значениями которого, можно построить кривую – линию зацепления.

Аналогичным образом найдем уравнение профиля зуба фрезы. Для этого определим координаты точки e , принадлежащей боковой режущей кромке зуба.

Из рис. 10.58 следует, что при обкате начальной окружности детали с радиусом r_w по начальной прямой фрезы полюс P займет положение P_1 , а пройденный им путь $PP_1 = eC$ будет равен развертке дуги окружности $P\tilde{A} = r_w\beta$.

При неизменной координате $Y_e = Y_c$ и $fC = X_c$ найдем

$$X_e = eC - fC = r_w\beta - X_c.$$

Так как угол α_c является внешним для треугольника OmA , то $\alpha_c = \beta + \Delta$. Подставив значения $\beta = \alpha_c - \Delta$ и X_c , из уравнения (10.107) получим

$$X_e = r_w(\alpha_c - \Delta) - (r_w \sin \alpha_c - b/2) \cos \alpha_c.$$

Заменим $b/2 = r_w \sin \Delta$ и найдем координаты точки e по уравнениям

$$\begin{cases} X_e = r_w[(\alpha_c - \Delta) - (\sin \alpha_c - \sin \Delta) \cos \alpha_c] \\ Y_e = r_w(\sin \alpha_c - \sin \Delta) \sin \alpha_c. \end{cases} \quad (10.108)$$

Для любой i -й точки боковой режущей кромки фрезы можно представить уравнение профиля в общем виде:

$$\begin{cases} X_i = r_w[(\alpha_i - \Delta) - (\sin \alpha_i - \sin \Delta) \cos \alpha_i] \\ Y_i = r_w(\sin \alpha_i - \sin \Delta) \sin \alpha_i. \end{cases} \quad (10.109)$$

Однако уравнения (10.109) для практического применения неудобны, так как здесь α_i переменны, а рассчитанные координаты X_i и Y_i могут выйти за пределы высоты зуба. Поэтому лучше задавать не значение переменной α_i , а ординату профиля, отыскивая по ней значения α_i и X_i .

Считая Y_i заданным, решим систему уравнений (10.109) относительно α_i .

Из второго уравнения системы (10.109) следует, что

$$r_w \sin^2 \alpha_i - r_w \sin \Delta \sin \alpha_i - Y_i = 0.$$

Решив это квадратное уравнение, найдем, что

$$\sin \alpha_i = \frac{r_w \sin \Delta + \sqrt{r_w^2 \sin^2 \Delta + 4r_w Y_i}}{2r_w} = \frac{\sin \Delta}{2} + \sqrt{\frac{\sin^2 \Delta}{4} + \frac{Y_i}{r_w}}. (10.110)$$

Таким образом, профиль зуба фрезы можно построить по точкам, задаваясь значением Y_i в пределах высоты зуба $h = r_w - r_f$. При заданном на чертеже детали значении Δ найдем α_i , а затем по уравнению (10.109) – координату X_i .

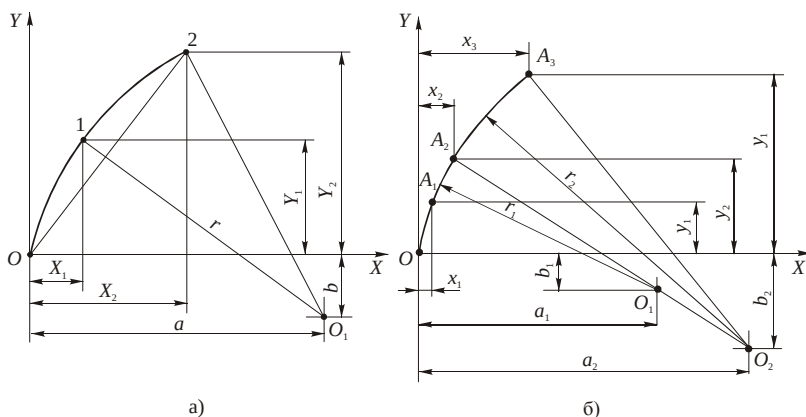


Рис. 10.59. Построение профиля зуба шлицевой червячной фрезы путем замены теоретического профиля: a – дугой одной окружности; b – дугами двух сопряженных окружностей

Обычно профиль зуба строится в увеличенном масштабе с расположением начала координат у основания зуба. Его можно построить по ограниченному числу точек. Как показали расчеты, при $h \leq 0,12r_w$ для этого достаточно найти координату X для двух точек: 1) $Y_1 = 0,5h$; 2) $Y_2 = 0,9h$ (рис. 10.59, а). Затем, пользуясь формулами из аналитической геометрии, можно рассчитать радиус дуги окружности r , заменяющей теоретическую кривую профиля, и координаты ее центра a и b . При $h > 0,12r_w$ с целью уменьшения погрешностей при такой замене находят координаты двух промежуточных точек A_1 и A_2 , а по ним радиусы r_1 и r_2 двух сопрягаемых окружностей, заменяющих теоретический профиль (рис. 10.59, б).

Можно воспользоваться также специальными таблицами [21, 25], в которых по величине $\Delta = \arcsin b / 2r_w$ приведены значения a , b и r для трех случаев, когда $h < 0,12 r_w$, $h = (0,12 \dots 0,16) r_w$ и $h = (0,16 \dots 0,20) r_w$. Там же приведена получаемая погрешность профиля δ , неизбежная при замене указанной кривой дугой окружности, которая должна укладываться в пределах допуска на толщину шлица.

Замена теоретического профиля одной или двумя дугами окружностей значительно упрощает изготовление фрез и правку шлифовальных кругов.

Определение радиуса начальной окружности. Радиус начальной окружности определяется из условия наиболее полной обработки боковой поверхности шлица. Как было показано на рис. 10.57, наивысшая точка A линии зацепления фрезы и вала лежит несколько выше начальной окружности. Поэтому прямолинейный участок шлица может быть получен до окружности радиуса ρ_A (рис. 10.60), проходящей через точку A .

Найдем по уравнениям (10.107) координаты точки A :

$$\begin{cases} X_A = (r_w \sin \alpha_A - b/2) \cos \alpha_A \\ Y_A = (r_w \sin \alpha_A - b/2) \sin \alpha_A \end{cases} \quad (10.111)$$

Ординату Y_A определим по методу нахождения экстремума линии зацепления. Для этого продифференцируем уравнение Y_A по угловому параметру α_A и приравняем его к нулю:

$$\frac{dY}{d\alpha} = 2r_w \sin \alpha_A \cos \alpha_A - b/2 \cos \alpha_A = 0,$$

из чего следует, что $\sin \alpha_A = b / 4r_w$.

Подставим значение α_A в уравнения (10.111) и найдем, что

$$\begin{cases} X_A = -\frac{b}{4} \sqrt{1 - \frac{b^2}{16r_w^2}}; \\ Y_A = -\frac{b^2}{16r_w}. \end{cases} \quad (10.112)$$

Из рис. 10.60 видно, что радиус

$$\rho_A^2 = X_A^2 + (r_w + Y_A)^2.$$

ку C – начало переходной кривой:

$$r_c = OC = \sqrt{OA^2 + AC^2} = \sqrt{r_f^2 + h^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_c}.$$

Значение угла зацепления α_c найдем по уравнению (10.110), подставив значение $Y_c = h = r_w - r_f$:

$$\sin \alpha_c = \frac{\sin \Delta}{2} + \sqrt{\frac{\sin^2 \Delta}{4} + \frac{h}{r_w}}.$$

Тогда высота галтели

$$h_T = r_c - r_f.$$

Здесь радиус r_f задается на чертеже детали.

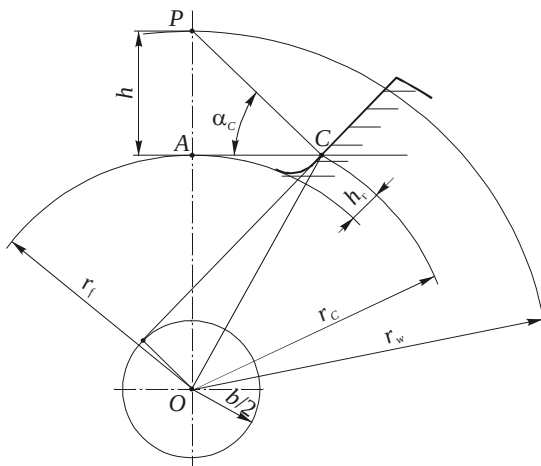


Рис. 10.61. Схема определения высоты переходной кривой у основания шлица

Определение размеров «усиков» фрезы. При посадке шлицевого соединения по внутреннему диаметру галтель недопустима, поэтому шлиц должен быть прямолинейным до окружности впадин. С этой целью выполняется модификация профиля зуба фрезы, которая выражается в увеличении его высоты путем образования выступов на наружном диаметре фрезы, называемых в технической литературе «усиками», которые формируют поднутрение у основания шлицев.

инструментальная рейка, расположенная в сечении, нормальном к виткам.

После вычерчивания профиля зубьев для построения рейки необходимо также определить шаг P_{n0} и толщину зуба S_{n0} в нормальном сечении и другие элементы рейки.

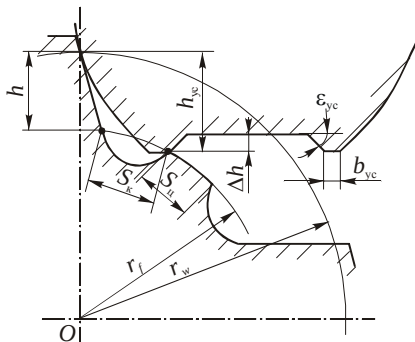


Рис. 10.63. Схема нарезания шлицев червячной фрезой с «усиками»

На рис. 10.64, а показана инструментальная рейка фрезы для нарезания шлицев с центрированием по наружному диаметру, а на рис. 10.64, б – зуб фрезы с «усиками», применяемой для нарезания шлицев с центрированием по внутреннему диаметру. Шаг витков P_{n0} , как следует из условия обката, равен окружному шагу шлицев по начальной окружности вала, т.е.

$$P_{n0} = P_1 = \pi d_w / z ,$$

где Z – число шлицев.

Толщина зуба по начальной прямой в сечении, нормальном к виткам, равна разности шага шлицев P_1 и толщины шлица b , измеренной по начальной окружности, т.е.

$$S_{n0} = P_1 - b = \pi d_w / z - d_w \cdot \Delta = d_w (\pi / z - \Delta) .$$

Угол профиля шлицев Δ найдем из уравнения $\sin \Delta = b / 2r_w$. Для перевода в радианы необходимо значение угла в градусах умножить на 0,017453.

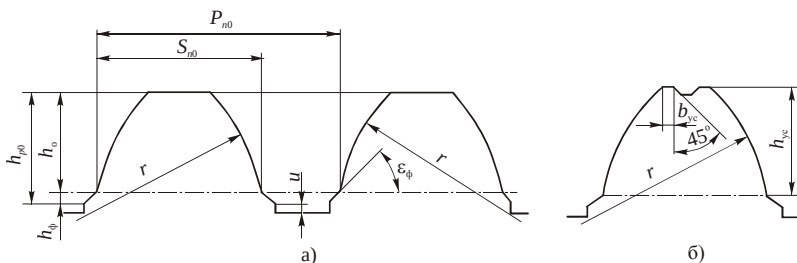


Рис. 10.64. Инструментальная рейка шлицевой червячной фрезы: а – без «усиков»; б – с «усиками»

Высота зуба фрезы $h_o = r_w - r_f$, рабочая высота $h_{po} = h_o + e + h_\phi$, где e – превышение крайней точки линии зацепления над начальной окружностью ($e = \rho_a - r_w$); h_ϕ – высота заплечиков, снимающих фаски на шлицах по наружному радиусу r_a . Принимают $h_\phi = 2f$ с углом $\varepsilon_\phi = 35..50^\circ$.

Шлицевые валы по наружной поверхности фрезой не обрабатываются. В этой связи предусматривается зазор в виде канавки глубиной $u = 1,5...3,0$ мм (рис. 10.63).

Для фрез с «усиками» указанные выше параметры по величине те же, что и для фрез без «усиков», кроме высоты зуба h_{yc} , определяемой по уравнению (10.114). Другие размеры «усиков» приведены выше.

Габаритные размеры фрезы и некоторые конструктивные и геометрические параметры, указываемые на рабочем чертеже, принимают по ГОСТ 8027–81 или по рекомендациям для червячных фрез с заточенными зубьями.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как построить эвольвенту?
2. Дайте определение окружностей зубчатого эвольвентного зацепления.
3. Чему равна номинальная длина и рабочий участок линии зацепления? Виды и размеры шагов между зубьями.
4. Чем отличаются исходные контуры зубчатой и инструментальной реек?
5. Что такое корригирование зубчатых колес? В чем суть высотного корригирования? Как оно влияет на высоту ножки и головки зуба, его толщину по делительной окружности?
6. Чему равна толщина зуба колеса на окружности любого радиуса?
7. Чему равен угол зацепления у некорригированных и корригированных колес?
8. Чему равно межцентровое расстояние в зацеплении корригированных и некорригированных колес?
9. На какие параметры зубчатого колеса и каким образом влияет смещение профиля у корригированного зубчатого колеса?
10. Как определить модуль у корригированного и некорригированного колеса?
11. Какие зуборезные инструменты работают по методу копирова-

ния? В чем достоинства и недостатки метода?

12. Как решается задача профилирования режущих кромок у инструментов, работающих по методу копирования? Как построить профиль нерабочего участка впадин зубьев колес при $z_1 > 34$ и $z_1 < 34$?
13. В чем суть комплектования дисковых модульных зуборезных фрез? Что оно дает? Почему с увеличением модуля число номеров комплекта растет?
14. От чего зависят кривизна профиля и высота зуба у дисковой модульной фрезы? Как меняется задний угол в разных точках зуба дисковой модульной фрезы?
15. Как можно повысить производительность при нарезании крупномодульных колес дисковыми модульными фрезами?
16. В чем особенность конструкции пальцевых модульных фрез? Когда они применяются? В чем их достоинства и недостатки?
17. Как перетачиваются дисковые и пальцевые модульные фрезы? Как выбирается направление затылования у этих фрез?
18. По какому принципу работают червячные зуборезные фрезы? В чем их преимущества и недостатки по сравнению с другими зуборезными инструментами?
19. Найдите связь между углом подъема витков червячной фрезы, модулем и диаметром делительного цилиндра червячной фрезы.
20. На базе каких типов червяков изготавливаются червячные зуборезные фрезы и почему?
21. В чем заключается и как решается задача профилирования червячных фрез, изготавливаемых на базе архимедовых и конволютных червяков?
22. Как выбирают направление стружечных канавок у червячных зуборезных фрез? Как найти шаг винтовой стружечной канавки у червячных зуборезных фрез?
23. Как осуществляется затылование зубьев червячных зуборезных фрез? Почему профиль зубьев у архимедовых червячных фрез после затылования в осевом сечении несимметричен?
24. Чему равен расчетный диаметр делительного цилиндра? Как назначается рабочая длина червячных зуборезных фрез? Как определяется наружный диаметр червячных зуборезных фрез? На что он влияет?
25. Чему равны передний и задний углы на боковых режущих кромках зубьев червячных фрез? Как они влияют на стойкость

фрез?

26. Достоинства и недостатки зуборезных долбяков. Типы долбяков.
27. Назовите особенности конструкции долбяков и их основные конструктивные и геометрические параметры.
28. Докажите постоянство заднего угла вдоль боковых режущих кромок долбяка в нормальном сечении. Как изменяется задний угол в цилиндрическом сечении по длине боковых режущих кромок долбяка?
29. Как рассчитывается коррекция угла профиля долбяка? Как она сказывается на погрешности нарезаемых зубчатых колес?
30. Как определяется исходное расстояние нового долбяка? На что оно влияет? Как рассчитать максимальное смещение профиля долбяка из условия допустимого заострения зубьев?
31. Что такое интерференция зубчатых колес, в чем она проявляется и каковы ее причины?
32. Дайте вывод условия отсутствия интерференции при нарезании колес долбяком.
33. Как находится допустимое отрицательное смещение у сточенного долбяка?
34. Дайте вывод условия отсутствия подреза ножки и среза головки зубьев колес, нарезаемых долбяком, при отрицательном смещении профиля режущих зубьев.
35. Как перетачиваются долбяки при затуплении режущих кромок? Каким образом меняется при этом межцентровое расстояние между долбяком и колесом?
36. Типы шеверов, области их применения и особенности конструкций.
37. В чем преимущества дисковых шеверов? Какова кинематика их рабочих движений?
38. В каких сечениях и как определяются основные параметры дискового шевера?
39. Как рассчитать их размеры у нового и сточенного шевера?
40. В чем заключаются проверочные расчеты зубьев шевера при проектировании?
41. Как определить условия отсутствия интерференции колес, обработанных шевером?
42. Виды обкаточных инструментов для нарезания зубьев с неэвольвентным профилем и ограничения для их применения.
43. Как построить линию зацепления червячной фрезы и шлицево-

го вала с прямобочными шлицами графическим методом? Вывод уравнения линии зацепления.

44. Вывод уравнения профиля зуба червячной фрезы для нарезания прямобочных шлицев методом обката. Построение профиля зубьев.
45. Определение радиуса начальной окружности шлицевого вала с прямобочными шлицами, нарезаемого червячной фрезой по методу обката.
46. Определение высоты переходной кривой у основания прямобочного шлица с посадкой по наружному диаметру и высоты «усика» у фрез для нарезания шлицев с посадкой по внутреннему диаметру.

11. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЬЕВ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС

Конические зубчатые колеса применяют для передачи движения и усилий между валами, оси которых пересекаются или скрещиваются в пространстве. По сравнению с цилиндрическими колесами конические колеса менее распространены. Однако в ряде отраслей промышленности (авиа-, авто-, трактор-, станкостроение и др.) их использование является традиционным и часто позволяет получать единственно рациональное конструкторское решение.

По форме линии зубьев конические колеса делят на две основные группы: 1) с прямыми зубьями; 2) с криволинейными зубьями.

Колеса первой группы просты в изготовлении и применяются для передачи относительно небольших нагрузок в узлах, работающих с малыми окружными скоростями ($\leq 8 \dots 10$ м/с), для которых бесшумность и плавность не имеет существенного значения.

В последние годы наметилась тенденция к замене колес первой группы на колеса второй группы. Она объясняется тем, что колеса второй группы обладают рядом преимуществ, главные из которых: 1) плавность и бесшумность при работе на высоких скоростях; 2) большая прочность и износостойкость зубьев; 3) возможность осуществления больших передаточных отношений (до 100); 4) меньшая чувствительность к погрешностям монтажа.

К недостаткам колес второй группы относятся: 1) большие стоимость и трудоемкость изготовления; 2) необходимость иметь сложные специальные станки и инструменты; 3) большие осевые нагрузки в передачах, вызванные конфигурацией зубьев.

11.1. Основные сведения о конических передачах и параметрах зубчатых колес

Коническая передача (рис.11.1) состоит из шестерни 1, имеющей меньшее число зубьев (z_1) и колеса 2 с большим числом зубьев (z_2), относительное движение которых можно представить как качение без скольжения друг по другу их начальных конусов (аксоидов). Линии пересечения начальных конусов и боковых поверхностей зубьев называют **линиями зубьев**.

В прямозубых конических передачах линии зубьев прямые и при своем продолжении они пересекают ось колеса (рис.11,1,а).

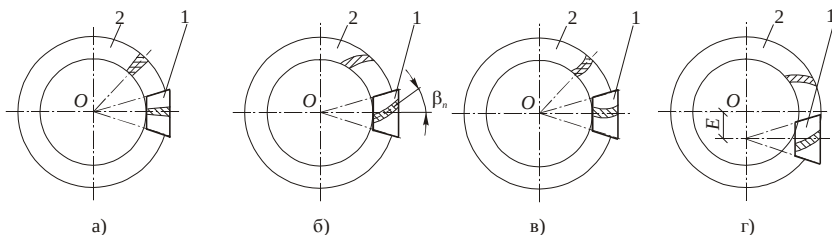


Рис.11.1. Типы конических передач: а – прямозубые;

б – с круговыми зубьями ($\beta_n > 0$); в – типа Зерол ($\beta_n = 0$); г – гипоидные ($\beta_n > 0$)

Конические колеса с криволинейными зубьями бывают трех разновидностей: 1) с круговыми зубьями, у которых линии зубьев имеют вид дуги окружности с углом наклона $\beta_n > 0$ (рис.11.1,б); 2) с криволинейными зубьями (типа Зерол) и углом наклона $\beta_n = 0$ (рис.11.1,в); 3) гипоидные, со смещением E оси шестерни относительно оси колеса и углом наклона $\beta_n > 0$ (рис.11.1,г).

Конические передачи с круговыми зубьями имеют в зацеплении одновременно не менее двух зубьев, обеспечивая за счет формы зуба непрерывный контакт, бесшумность и плавность даже при высоких скоростях вращения. При этом передаваемые мощности на 30% больше, чем у прямозубых конических колес.

Колеса типа Зерол, как и прямозубые конические колеса, работают с минимальными осевыми нагрузками. Они легко шлифуются после термообработки, благодаря чему достигается высокая точность. Поэтому колеса типа Зерол применяют в высокоскоростных передачах (≤ 76 м/с),

используемых в авиастроении. Их можно устанавливать также в приводах, где ранее применялись прямозубые колеса.

Гипоидные колеса за счет увеличения угла наклона зубьев β_n и коэффициента перекрытия работают более плавно и бесшумно, чем передачи с круговыми зубьями. Они широко применяются в автомобилестроении, так как благодаря смещению осей шестерни и колеса дают возможность конструировать низко опущенные кузова автомобилей.

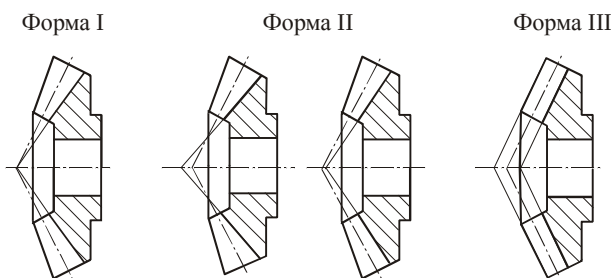


Рис. 11.2. Основные формы зубьев конических колес:

I - пропорционально понижающиеся; II – со смещением вершин конусов;
III - равновысокие

В соответствии с ГОСТ 19325-73 различают три формы зубьев в осевом сечении конических зубчатых колес (рис.11.2). У формы I вершины конусов делительного и впадин совпадают, а высота ножки зубьев пропорционально понижающаяся от внешнего торца к внутреннему торцу. У формы II вершины конусов делительного и впадин не совпадают, а у формы III образующие конусов делительного, впадин и вершин параллельны (равновысокие зубья).

Обычно прямозубые колеса изготавливают формы I и реже формы II. Конические колеса с криволинейными зубьями могут иметь любую из указанных форм. При этом форма II позволяет регулировать ширину впадин и толщину зуба по его длине, если это требуется по технологическим соображениям, или в связи с требованием увеличения прочности зубьев колеса.

Элементы конической передачи и основные параметры отдельно взятого колеса по ГОСТ 19325-73 представлены на рис.11.3. На схеме зацепления конических колес с зубьями формы I образующие делительного конуса, а также конусов вершин и впадин шестерни 1 и колеса 2

- средняя точка зуба, лежащая на образующей начального (делительного) конуса по середине длины зуба - m ;
- конусные расстояния, соответственно, внешнее, внутреннее и среднее - R_e, R_i, R_m ;
- внешние диаметры, соответственно, вершин и впадин зуба - d_{ae}, d_{fe} ;
- внешний делительный диаметр - d_e ;
- средний делительный диаметр - d_m ;
- угол делительного конуса - δ ;
- углы конусов, соответственно, вершин и впадин - δ_a, δ_f ;
- углы, соответственно, головки и ножки зуба - θ_a, θ_f ;
- угол наклона линии криволинейного зуба к оси в точке m нормального сечения - β_n ;
- внешняя высота зуба - h_e ;
- модуль зуба в средней точке нормального сечения - $m_n = d_m / z$;
- передаточное отношение колеса (z_2) и шестерни (z_1) - $u = z_2 / z_1$.

Из приведенных основных параметров конических колес видно, что их намного больше, чем параметров цилиндрических колес. При этом многие из них имеют переменное значение по длине зуба, например, высота зуба, ширина впадины, диаметры в различных сечениях и т.д. Это существенно усложняет методики расчета зуборезных инструментов и наладки операций зубонарезания.

11.2. Методы и инструменты, применяемые для нарезания зубьев конических колес

Нарезание зубьев конических колес, также как и цилиндрических колес, заключается в удалении металла из впадин между зубьями при черновой обработке и окончательном формировании зубьев при чистовой обработке. Для этого используют два метода: 1) копирования; 2) обкаточного огибания. Иногда оба метода совмещают в одной операции (комбинированный метод).

Метод копирования подробно рассмотрен в гл.10 применительно к случаю нарезания зубьев цилиндрических колес. Профиль режущих кромок инструментов, работающих по методу копирования, делается подобным профилю впадин зубьев нарезаемых колес.

В качестве режущих инструментов при черновой обработке прямозубых конических колес методом копирования применяют дисковые и

пальцевые фрезы. Последние можно использовать и для нарезания криволинейных зубьев. Кинематика процесса зубонарезания по методу копирования проста: инструмент вращается вокруг своей оси и перемещается с некоторой подачей вдоль образующей конуса впадин детали, которая при этом неподвижна. После нарезания одной впадины с помощью делительного механизма станка производится поворот заготовки на один окружной шаг зубьев.

Профиль режущих кромок фрез при черновой обработке чаще всего делают прямолинейным с оставлением припуска на чистовую обработку. Диаметр вершин зубьев пальцевых фрез принимают несколько меньшим ширины дна впадины у внутреннего торца колеса, где она наименьшая, и больше половины ширины – у наружного торца, где она наибольшая.

В условиях единичного и мелкосерийного производств при отсутствии специальных станков дисковыми и пальцевыми фрезами можно производить также чистовую обработку зубьев на универсально-фрезерных станках. При этом профилирование режущих зубьев этих инструментов ведется по среднему сечению впадины зуба колеса с изменением угла установки оси фрезы относительно оси заготовки. Обработка ведется в два прохода: сначала обрабатывается боковая поверхность одного зуба колеса, а затем боковая поверхность соседнего зуба.

По методу копирования прямые зубья конических колес нарезают также круговыми протяжками. При этом за один оборот протяжки формируется одна впадина фасонного профиля.

Метод копирования используется также при нарезании криволинейных зубьев в так называемых полуобкатных передачах. В этом случае нарезание колеса (z_2) производят либо зуборезными головками при включенном движении обката, либо головками-протяжками. Отключение движения обката в обоих случаях позволяет сократить путь резания, увеличить режимы резания, а, следовательно, и производительность обработки. При этом профиль режущих кромок инструмента и, соответственно, профиль нарезаемых зубьев в сечении, перпендикулярном линии зуба, прямолинейный. Следует отметить, что наибольшее увеличение производительности достигается при чистовой обработке колес (z_2) головками-протяжками.

Метод обкаточного огибания (обката) при нарезании прямозубых конических колес, а также конических колес с криволинейными зубьями получил большее применение, чем метод копирования, так как он позволяет изготавливать зубья с профилем, близким к эвольвентному. В основе этого метода лежит принцип зацепления нарезаемого колеса с

плоским производящим колесом, у которого угол начального (делительного) конуса $\delta = 90^\circ$, то есть образующие этого конуса лежат в плоскости, перпендикулярной оси колеса (рис.11.4,а).

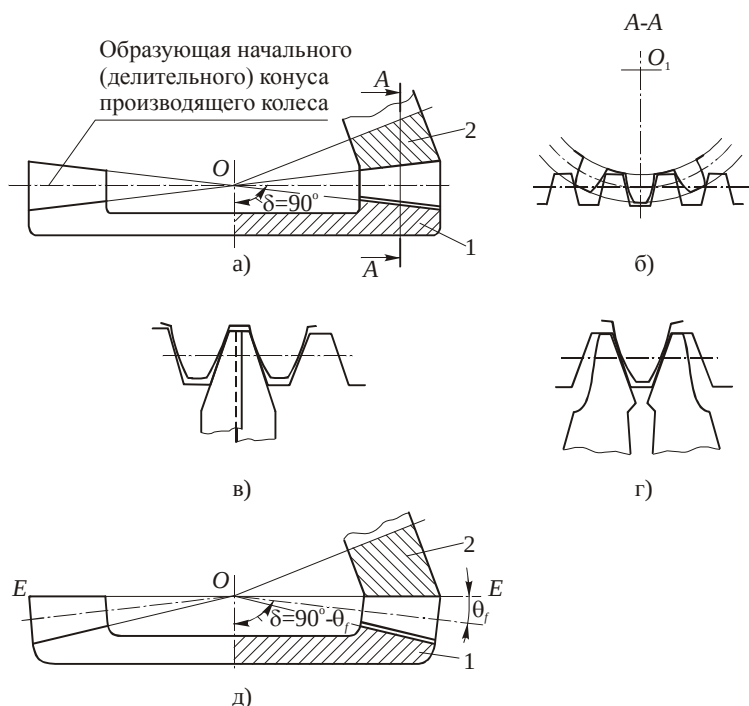


Рис.11.4. Образование зубьев конических колес:

а...г - $\delta = 90^\circ$; б - $\delta = 90^\circ - \theta_f$

Здесь производящее колесо 1 – воображаемое колесо. Его роль выполняет люлька зуборезного станка, а роль зубьев – режущие резцы инструмента, установленного на люльке. Для снятия припуска у заготовки 2 резцы от отдельного привода получают движение резания вдоль линии направления зуба. В процессе формирования зубьев колеса имеет место сочетание двух движений: резания и обката заготовки относительно производящего колеса. Этот принцип аналогичен применяемому при обработке цилиндрических зубчатых колес при их зацеплении с исходным контуром рейки. В случае обката делительного конуса заго-

товки по начальному конусу производящего колеса в среднем сечении $A-A$ имеет место зацепление круговой рейки с заготовкой (рис.11.4,б). В этом случае зубья нарезаемого колеса приобретают эвольвентный профиль с незначительным подрезанием ножки и головки. При этом режущие зубья инструмента воспроизводят или зуб (рис.11.4,в), или впадину зуба рейки (рис.11.4,г).

На практике с целью упрощения конструкции станков и повышения жесткости узла крепления головки плоское производящее колесо заменяют плосковершинным (рис.11.4,д) с углом начального конуса $\delta = 90^\circ - \theta_f$, где θ_f - угол ножки зуба обрабатываемого колеса. Тогда вершинные режущие кромки зубьев инструмента совершают движение в плоскости $E-E$, перпендикулярной оси колеса. Так как значения угла θ_f у шестерни и колеса немного отличаются, то при нарезании их зубьев от одного производящего колеса такая замена вызывает погрешность угла зацепления. Однако, как будет показано ниже, в значительной степени эта погрешность компенсируется номерными поправками при назначении угла профиля резцов зуборезных головок.

Шестерню и колесо с криволинейными зубьями у обкатных передач нарезают методом обката. В полуобкатных передачах шестерню нарезают методом обката, а колесо – методом копирования. В эксплуатационном отношении оба типа передач равноценны. Это объясняется тем, что с увеличением числа зубьев колеса $z_2 \gg z_1$ эвольвентный профиль зубьев приближается к прямолинейному (см.гл.10). Однако полуобкатные передачи с целью повышения производительности процесса зубонарезания более предпочтительны и применяются, главным образом, в условиях крупносерийного и массового производств при изготовлении передач с передаточным отношением $u \geq 2,5$.

11.3. Инструменты для нарезания конических колес с прямыми зубьями

Зубострогальные резцы получили наибольшее применение для нарезания прямозубых конических колес. Они применяются на чистовых операциях и работают по методу обката, а также на черновых операциях – по методу копирования. В последнем случае используются те же станки, что и при методе обкаточного огибания, но работающие при выключенном движении обката.

Строгание каждого зуба колеса производится двумя резцами на станках-полуавтоматах моделей 5С276П, 5А26 и др., а также фирмы

Глисон (США) по схеме, представленной на рис.11.5,а. Здесь резцы 1 и 2, установленные в суппорте на люльке станка, представляют собой впадину зуба воображаемого производящего колеса 3, с которым в процессе зубонарезания находится в зацеплении обрабатываемое колесо 4.

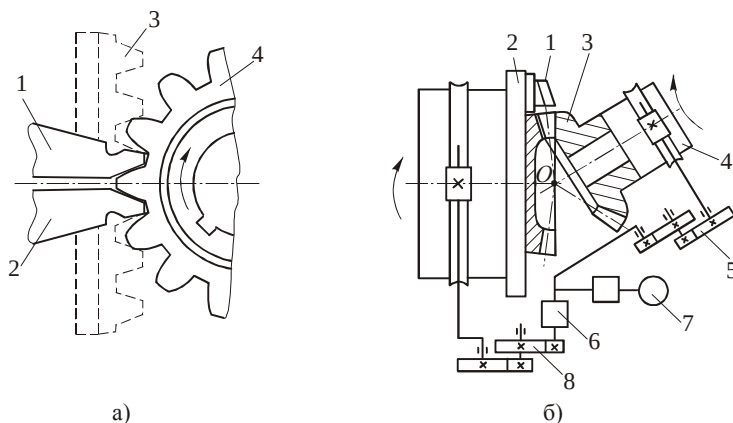


Рис.11.5. Нарезание прямозубых конических колес: а – схема резания; б – кинематическая схема зубострогального станка

Как видно из кинематической схемы зубострогального станка (рис.11.5,б), в процессе обката заготовка колеса 3, установленная в бабке 4, при вращении вокруг своей оси кинематически связана с вращением люльки 2. На схеме также показаны: 5 – гитара деления; 6 – механизм деления; 7 – электропривод; 8 – гитара обкатки.

В процессе обработки резцы 1 получают возвратно-поступательное движение от кулачков (на схеме не показаны) и работают попеременно. При движении к точке *O* пересечения образующих начальных конусов производящего и нарезаемого колес одну боковую поверхность зуба колеса обрабатывает (при прямом ходе) первый резец, а другую боковую поверхность (при обратном ходе) – второй резец. Движение обката осуществляется за счет поворота заготовки и люльки вокруг своих осей.

При черновом нарезании движение обката выключается и оба резца совершают только возвратно-поступательное движение и нарезают зубья с прямолинейным профилем по методу копирования. Таким способом нарезают колеса модулем $m=2,5\ldots 16$ мм и диаметром до 800 мм. При этом из целой заготовки за одну операцию нарезают зубья модулем $m\leq 4$ мм, а свыше – за две операции: черновую и чистовую (за несколько

ходов в зависимости от модуля и требуемой точности). Колеса диаметром 800...3000 мм обрабатывают строганием по шаблону на специальных станках, например модели 5Е283 и др.

Зубострогание из-за прерывистости процесса и низких скоростей резания (12...15 м/мин) является малопроизводительным способом. Однако этот способ универсален, инструменты дешевы, просты по конструкции и обеспечивают высокую точность обработки (6...8 степень). Поэтому зубострогание получило широкое применение как в мелко-, так и в крупносерийном производствах.

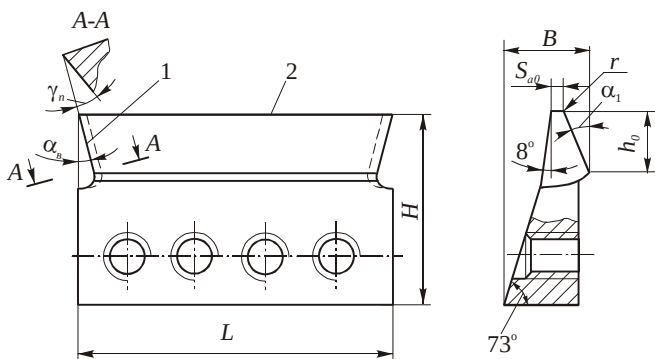


Рис.11.6. Зубострогальный резец

Зубострогальный резец для чистовой обработки (рис.11.6) представляет собой фасонный призматический инструмент с двумя взаимозаменяемыми рабочими частями на концах, имеющими прямолинейные боковую 1 и вершинную 2 режущие кромки. Зубострогальные резцы стандартизированы и выпускаются серийно. ГОСТ 5392-60 устанавливает четыре типа таких резцов, отличающихся размерами (H , L и др.) в зависимости от диапазона модулей нарезаемых колес. Например, резцы типа I предназначены для нарезания колес модулем $m=0,3...3,25$ мм, а типа IV – для нарезания колес модулем $m=13...20$ мм. Профиль режущих кромок черновых резцов не регламентируется и может быть ступенчатым или криволинейным, обеспечивающим равномерный припуск под чистовую обработку. Зажимная часть зубострогального резца выполнена в виде клина с углом 73° , что обеспечивает его плотное прилегание к плоскостям державки. Резец крепится в державке винтами, число которых (2...5) зависит от его типоразмера. Передняя грань резцов плоская, заточенная у стандартных резцов под углом в нормальном се-

чении $\gamma_n = 20^\circ$. В зависимости от свойств обрабатываемых материалов резцы затачивают также и под другими углами ($\gamma_n = 10 \dots 25^\circ$). Задний угол на вершинной кромке в статическом положении резца $\alpha_b = 0^\circ$. В рабочем положении за счет поворота резца относительно дна впадины нарезаемого колеса задний угол при вершине $\alpha_b = 12^\circ$ (рис.11.7). На боковой режущей кромке задний угол $\alpha_b < \alpha_b$.

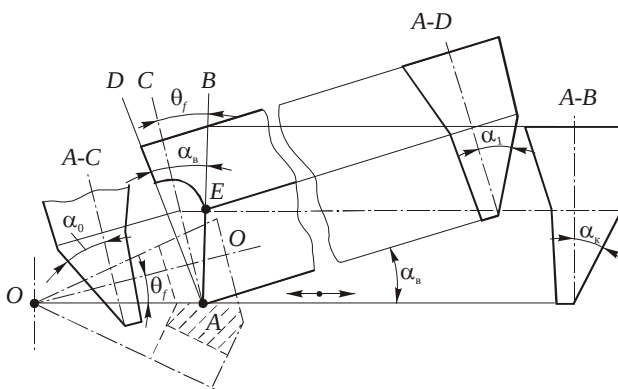


Рис.11.7. Углы профиля зубострогального резца в рабочем положении

При изготовлении зубострогальных резцов угол профиля α_1 задается в плоскости AD , перпендикулярной основанию резца. При установке резца на станке контролируется кинематический угол α_k в плоскости AB , перпендикулярной направлению движения резания. Теоретический угол зацепления α_0 задается в сечении AC , перпендикулярном образующей начального конуса OO колеса, которая наклонена к внутреннему конусу под углом θ_f .

Из рис.11.7 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha_k = \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \theta_f ; \operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_k / \cos \alpha_b = \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \theta_f / \cos \alpha_b . \quad (11.1)$$

Если $\alpha_0 = 20^\circ$, $\theta_f = 4^\circ$, $\alpha_b = 12^\circ$, то $\alpha_k = 19^\circ 54' 16''$ и $\alpha_1 = 20^\circ 21' 58''$.

Так как угол θ_f у разных колес будет разным, то и значения углов α_k и α_1 также должны быть разными. Однако отличия этих углов от

угла α_0 малы, поэтому с целью сокращения номенклатуры резцов принято: $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_0 = 20^\circ$. Разницу этих углов $\Delta\alpha = \alpha_{0ф} - \alpha_0$ подсчитаем, предварительно определив из уравнения (11.1) величину фактического угла зацепления по уравнению (11.1)

$$\operatorname{tg} \alpha_{0ф} = \operatorname{tg} \alpha_k / \cos \theta_f .$$

Тогда, при $\theta_f = 4^\circ$ и $\alpha_k = 20^\circ$, $\Delta\alpha = 2'48''$, то есть разница $\Delta\alpha$ будет незначительной, укладывающейся в пределах неизбежных погрешностей настройки операции зубострогания.

В случае нарезания колес с небольшим числом зубьев, имеющих криволинейный (эвольвентный) профиль с малым радиусом кривизны, резцы должны были бы иметь такую же форму режущих кромок. При нарезании таких зубьев методом обката резцами с прямолинейным профилем имеет место подрез ножки и срез головки, то есть нарезанный зуб становится более выпуклым. Однако эти отклонения профиля нарезанного зуба составляют несколько микрометров и, в целом, только улучшают условия зацепления колес в передаче, исключая вероятность их заклинивания.

Дисковые фрезы для нарезания прямозубых конических колес получили широкое применение в крупносерийном и массовом производствах, так как обеспечивают повышение производительности в 3...5 раз по сравнению с зубостроганием. Обработка впадин зубьев колеса производится двумя фрезами 2, наклоненными друг к другу и расположенными в одной впадине колеса 1 (рис.11.8,а). При этом резцы 3 одной фрезы входят в промежутки между резцами 4 другой фрезы. Каждая фреза обрабатывает свою сторону зуба 5 колеса боковыми прямолинейными режущими кромками 6.

Шпиндели с закрепленными дисковыми фрезами устанавливают на люльке станка, которая при чистовой обработке совершает согласованное с обрабатываемым колесом движение обката. Зубья фрез, вращаясь вокруг оси инструмента, воспроизводят боковые поверхности зубьев производящего колеса и формируют боковые поверхности зубьев нарезаемого колеса. Такие колеса взаимозаменяемы с колесами, нарезанными зубостроганием.

Так как резцы фрезы при обработке каждой впадины не имеют движения подачи вдоль зуба, то дно впадины представляет собой вогнутую поверхность. При этом наибольшая вогнутость находится в середине длины зуба и равна

$$f = \frac{b^2}{4d_{ao}} \cos \alpha_o, \quad (11.2)$$

где b – длина зуба; d_{ao} – наружный диаметр фрезы; α_o – угол зацепления.

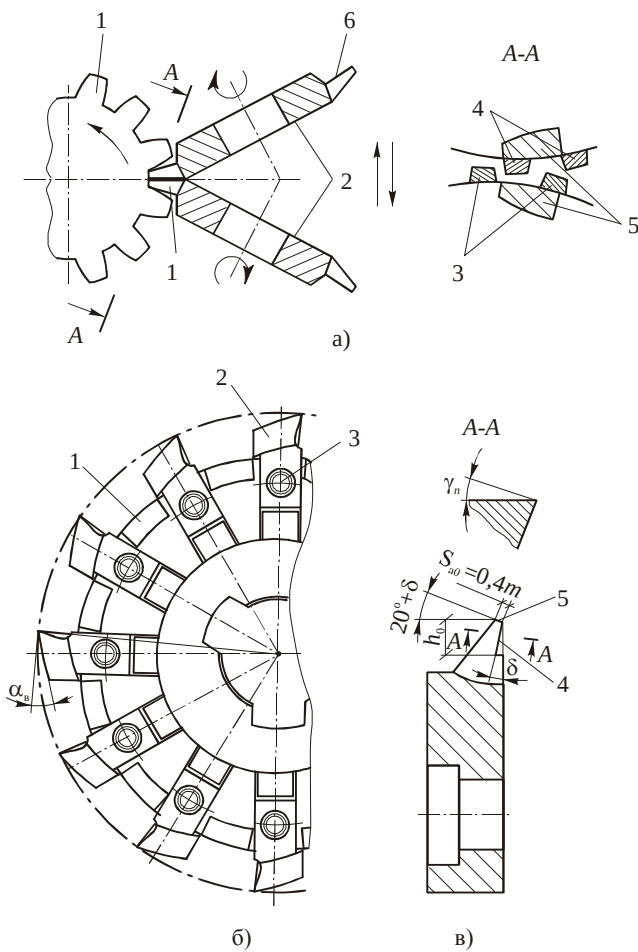


Рис.11.8. Дисковая зуборезная фреза: а – схема чистовой обработки зубьев конического колеса; б – конструкция сборной фрезы; в – нож фрезы

Из уравнения (11.2) следует, что с целью уменьшения вогнутости дна впадины нарезаемых колес последние должны иметь зубья малой длины, а дисковые фрезы должны быть максимального диаметра. Поэтому, например, для нарезания зубьев колес модулем $m \leq 3$ мм применяют фрезы с $d_{a0}=150$ мм, для $m=3...8$ мм - $d_{a0}=278$ мм, а для $m=8...12$ мм - $d_{a0}=450$ мм.

Черновое нарезание зубьев конических колес дисковыми фрезами обычно производится методом копирования. При этом люлька и заготовка неподвижны, а фрезы, вращаясь, врезаются в заготовку на полную глубину впадины обрабатываемого колеса. После этого фрезы отводятся от заготовки и производится ее поворот на величину окружного шага зубьев нарезаемого колеса.

Применяется также **комбинированный метод** нарезания зубьев дисковыми фрезами, когда после врезания на неполную глубину с оставлением припуска на чистовую обработку, включается движение обката и зубья колеса формируются окончательно. Этим методом зубчатые колеса модулем $m \leq 5$ мм нарезают из целой заготовки за одну операцию, а колеса больших модулей – за две операции: черновую и чистовую.

Дисковая зуборезная фреза представляет собой сборную одноугловую фрезу, оснащенную ножами 2, закрепленными на корпусе 1 винтами 3 (рис.11.8,б). Ножи имеют две прямолинейные режущие кромки: боковую 4 и вершинную 5 (рис.11.8,в). При обработке сталей передняя поверхность боковых прямолинейных режущих кромок плоская с углом $\gamma_n=20^\circ$. Для получения задних углов ножи затылуют с углом при вершине $\alpha_v=12^\circ$. Как и у зубострогальных резцов, ширина вершинной кромки зубьев дисковой фрезы $S_{a0} \cong 0,4m$. Для получения в продольном сечении бочкообразной формы зубьев колеса, улучшающей условия зацепления, на боковых режущих кромках затачивают угол поднутрения $\delta=1...5^\circ$.

Круговые протяжки (рис.11.9) обеспечивают наибольшую производительность при зубонарезании. Однако из-за высокой стоимости инструмента и станков они получили применение только в массовом производстве, главным образом, при изготовлении конических колес дифференциалов автомобилей, тракторов и приводов других транспортных машин. Из-за необходимости иметь большую ширину впадины на узком участке (со стороны внутреннего торца) круговыми протяжками нарезают зубья формы II (рис.11.2). Угол профиля зубьев круговых про-

тяжек с целью повышения их прочности увеличен до $\alpha = 22^\circ 30'$. Поэтому колеса, полученные протягиванием, не взаимозаменяемы с колесами, изготовленными строганием и фрезерованием.

Круглые протяжки часто выполняют комбинированными, так как они имеют черновые и чистовые зубья. Эти протяжки применяются на станках модели 5245 для обработки колес модулем $m \leq 5$ мм. Черновую обработку колес модулем $m = 5 \dots 8$ мм производят на станках модели 5С268, а чистовую – на станках модели 5С269. Для этих же целей применяют станки фирмы «Глисон» (США). Обработка на них производится методом копирования, когда за один оборот протяжки обрабатывается одна впадина зуба, а затем производится пересопряжение протяжки с заготовкой.

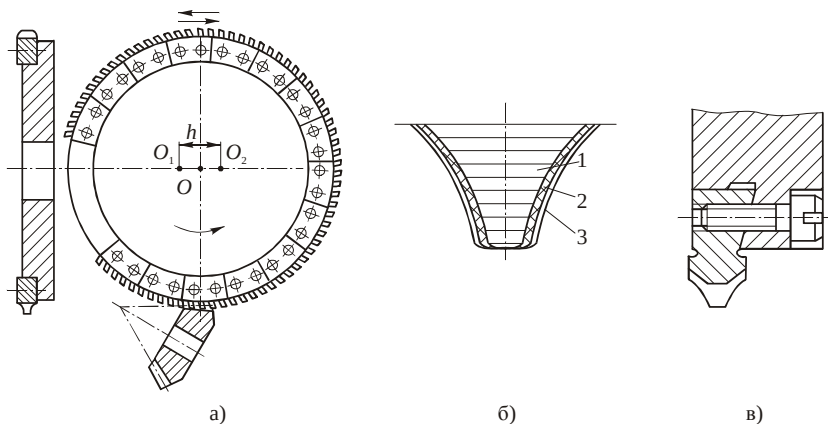


Рис.11.9. Круговая протяжка для нарезания прямозубых конических колес:
 а – конструкция протяжки; б – схема удаления припуска из впадины между зубьями нарезаемого колеса (1 – черновые зубья, 2 – полуочищенные зубья, 3 – чистовые зубья);
 в – крепление блока резцов протяжки и форма режущих кромок зубьев

Комбинированная круговая протяжка (рис.11.9,а) представляет собой диск, на котором закреплены винтами блоки (сегменты), имеющие по 2...4 резца. Часть диска свободна от резцов. У протяжки для нарезания колес передачи с $z_1=11$ и $z_2=20$, модуля $m=5$ мм установлено 15 блоков с 75 резцами, на которых 48 черновых, 7 полуочищенных и 20 чистовых. У круговых протяжек, как и у любых других протяжек, срезание припуска осуществляется за счет превышения последующего зуба над предыдущим. Кроме вращения протяжка совершает возвратно-

поступательное движение параллельно дну впадины зубьев нарезаемого колеса. При прямом ходе протяжки из точки O_1 в точку O_2 в работу вступают сперва черновые зубья, а затем получистовые. При обратном ходе протяжки из точки O_2 в точку O_1 происходит обработка чистовыми зубьями. В момент, когда протяжка подходит к заготовке участком, на котором нет зубьев, производится поворот заготовки на один угловой шаг. Таким образом, при непрерывном вращении протяжки время на нарезание одной впадины между зубьями составляет около 4 секунд.

Режущие зубья круговой протяжки затылованы с задним углом на вершинной кромке $\alpha_b = 12 \dots 15^\circ$ и передним углом в нормальном сечении по середине высоты зуба $\gamma_n = 15^\circ$. Переточка зубьев протяжки производится по передней грани.

Черновые зубья протяжки работают по генераторной схеме, а получистовые и чистовые – по профильной схеме (рис.11.9,б). Боковые режущие кромки зубьев криволинейны и подобны форме впадины обрабатываемого колеса. Способ крепления блоков резцов на корпусе круговой протяжки показан на рис.11.9,в.

Из кинематики процесса зубопротягивания следует, что при продольном перемещении протяжки вдоль впадины нарезаемых зубьев снятие припуска производится не только за счет их подъема, но и за счет работы протяжки как фрезы с продольной подачей. Поэтому в литературе такие инструменты иногда называют «фрезы-протяжки».

11.4. Инструменты для нарезания конических колес с криволинейными зубьями

Наибольшее применение для нарезания криволинейных зубьев конических колес получили **зуборезные головки**. По конструкции они представляют собой насадные торцевые фрезы, осуществляющие помимо вращения движение подачи вдоль своей оси.

В зависимости от размеров, направления вращения и характера операции зуборезные головки изготавливают цельными ($d_o = 20 \dots 80$ мм) и сборными ($d_o = 100 \dots 1000$ мм). Такими головками нарезают колеса модулем $m_n = 0,8 \dots 25$ мм и наибольшей высотой зуба $h = 70$ мм. Кроме того, в отечественной промышленности большое распространение получили резцовые головки фирмы Глисон (США), изготавливаемые в дюймовой системе ($d_o = 0,5'' (12,7 \text{ мм}) \dots 21'' (533,4 \text{ мм})$). В зависимости от вида обработки зуборезные головки могут быть: право- и леворежущими, одно-, двух- и трехстороннего резания, черновыми и чистовыми.

Обкатные передачи с криволинейными зубьями нарезают путем воспроизведения станочного зацепления плосковершинного производящего колеса с зубьями нарезаемого колеса при их взаимной обкатке по схеме, показанной на рис.11.10. Здесь роль воображаемого производящего колеса 1 выполняет люлька 2, ось вращения которой совпадает с осью шпинделя станка. Режущие резцы 4 зуборезной головки 5, установленной на люльке, при вращении от отдельного привода, воспроизводят зубья производящего колеса. Вращение заготовки 3 кинематически связано с вращением люльки. В результате профиль зубьев нарезаемых колес получается как огибающая ряда последовательных положений режущих кромок резцов головки. Кривизна зубьев определяется радиусом головки и положением ее центра на люльке станка. После нарезания одной впадины в обкаточном движении люлька отходит от заготовки и возвращается в исходное положение, а заготовка с помощью механизма деления поворачивается на один шаг. Далее цикл обработки повторяется. Таким образом, обработка зубьев колеса производится путем прерывистого обката.

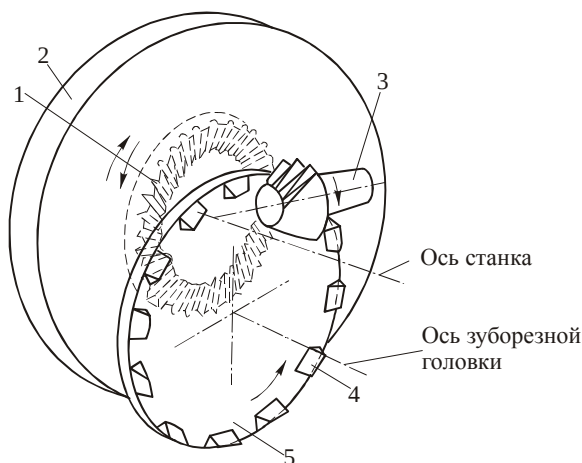


Рис.11.10. Схема нарезания криволинейных зубьев конических колес зуборезной головкой по методу обката

Для нарезания шестерен (z_1) с большой кривизной зубьев применяют станки с изменяемым углом наклона оси головки к оси шпинделя [26] и станки фирмы «Эрликон» (Швейцария). Последние, при нареза-

нии колес с равновысокими зубьями формы III (рис.11.2), работают путем непрерывного деления [17, 20].

Для нарезания зубьев колес (z_2) полуобкатных передач по методу копирования применяют высокопроизводительные станки, работающие зуборезными головками по способу врезания при отсутствии механизма обката, а для чистовой обработки этих колес применяют также зубопротяжные станки, оснащенные **головками-протяжками**.

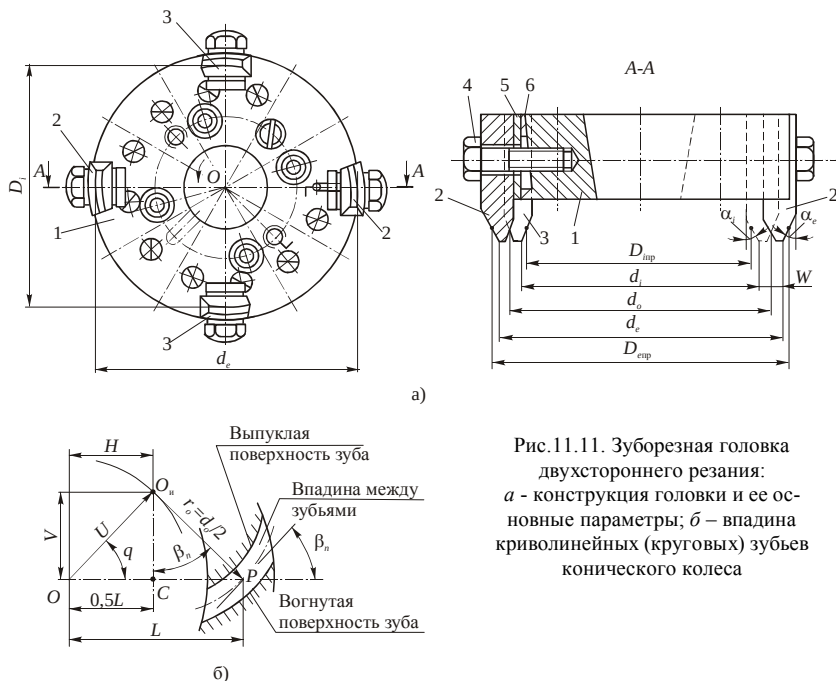


Рис.11.11. Зуборезная головка двухстороннего резания:
а - конструкция головки и ее основные параметры; б - впадина криволинейных (круговых) зубьев конического колеса

Устройство и основные параметры зуборезной головки рассмотрим на примере наиболее часто применяемой **головки двухстороннего резания** (рис.11.11,а). В корпусе головки 1 установлены попеременно резцы двух типов: наружные 2 (для обработки вогнутой поверхности зуба) и внутренние 3 (для обработки выпуклой поверхности зуба). Гнезда под эти резцы прямоугольные, изготовленные с высокой точностью. Резцы, установленные в гнезда, опираются своим выступом, расположенным над хвостовиком (рис.11.12), на торец корпуса головки и крепятся винтами 4. Для грубой регулировки резцов по диаметру применяют под-

кладки 5, а для тонкой – клинья 6, передвигаемые вдоль оси головки винтами (на рис.11.11,а не показаны). За базу при регулировке по диаметру принимают по одному резцу каждого типа, клинья которых закреплены штифтами. Корпус зуборезной головки изготавливают из конструкционной стали, а затем подвергают закалке и шлифовке. Резцы изготавливают из быстрорежущей стали.

Основные параметры зуборезной головки:

- номинальный диаметр d_o – это диаметр окружности, проходящей через середину расстояния между вершинами наружных и внутренних резцов, то есть через середину нарезаемого дна впадин колеса. При этом за вершину принимается точка пересечения боковой и вершинной режущих кромок резца;
- развод резцов W – это расстояние между вершинами наружных и внутренних резцов;
- образующие диаметры d_e , d_i – измеряются как расстояние между вершинами резцов одного типа, симметрично расположенных относительно оси головки. Из рис.11.11,а следует, что для наружных резцов $d_e = d_o + W$, а для внутренних – $d_i = d_o - W$;
- производящие диаметры $D_{e_{np}}$, $D_{i_{np}}$ – это расстояние между точками боковых режущих кромок, которые профилируют средние точки на профиле зубьев колеса, лежащие на начальном конусе. Отсюда для наружных резцов $D_{e_{np}} = d_e + 2h_f \operatorname{tg} \alpha_e$, а для внутренних резцов $D_{i_{np}} = d_i - 2h_f \operatorname{tg} \alpha_i$, где h_f – высота ножки зуба нарезаемого колеса; α_e , α_i – углы профиля соответствующих резцов.

Указанные параметры обеспечиваются регулировкой подкладками и клиньями.

При проектировании головки номинальный диаметр d_o назначают для колес с пропорционально понижающимися зубьями (форма I, рис.11.2) в зависимости от длины образующей начального конуса L и угла наклона линии зуба колеса β_n (рис.11.11,б)

$$d_o = L / \sin \beta_n.$$

Отсюда следует, что если угол наклона $\beta_n = 45^\circ$, то $d_o = 1,44L$; а если $\beta_n = 30^\circ$, то $d_o = 2L$. Чем больше угол наклона β_n , тем выше коэффициент перекрытия и плавность работы передачи, но меньше d_o и число

из конструкционной стали и соединяют сваркой с рабочей частью, изготовленной из инструментальной стали. Длина рабочей части резца берется несколько больше продольного размера хвостовика, в результате чего образуется выступ, которым резец опирается на торец корпуса резцовой головки, обеспечивая тем самым базирование в осевом направлении.

Плоскость хвостовика, обращенная к оси головки, называется базовой. Расстояние от базовой плоскости до вершины резца называется базовым расстоянием и обозначается b_e - у наружных резцов и b_i - у внутренних резцов. Толщина резца по вершине S_{ao} выбирается такой, чтобы она была несколько меньше ширины впадины зуба колеса в узкой части (у внутреннего торца) и не менее половины ширины впадин в широкой части (у внешнего торца колеса). Высота режущей части резца $h_o = (2,5...3,0)m_n$ выбирается по наибольшему размеру нарезаемых колес данного диапазона при заданном номинальном диаметре головки d_o .

Передняя грань резцов зуборезных головок затачивается под углами γ_{ce} и γ_{ci} в плоскости $C-C$, перпендикулярной к оси вращения головки. При установке резцов контролируется положение передней поверхности в плоскости $C-C$ по расстоянию A_e и A_i от оси головки (рис.11.13). Передний угол задается в сечении $A-A$ (рис.11.12), нормальном к режущей кромке и берется $\gamma_n = 20^\circ$ при обработке сталей средней твердости и $\gamma_n = 22...27^\circ$ - при обработке вязких сталей. Тогда углы в плоскости $C-C$ для резцов обоих типов определяются по следующим соотношениям:

$$\operatorname{tg} \gamma_e = \operatorname{tg} \gamma_n \cos \alpha_e ;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_i = \operatorname{tg} \gamma_n \cos \alpha_i ,$$

где α_e и α_i - углы профиля боковых режущих кромок.

Расстояния A_e и A_i (рис.11.13) находят по уравнениям

$$A_e = d_e / 2 \sin \gamma_e ;$$

$$A_i = d_i / 2 \sin \gamma_i .$$

Для создания задних углов на боковой и вершинной режущих кромках резцы затылуют по архимедовой винтовой поверхности в специальных приспособлениях. При этом на вершине зуба задняя поверхность

принимает круговую форму, а задний угол при вершине $\alpha_b = 11 \dots 13^\circ$. На боковой кромке задний угол меньше ($\alpha_{\bar{b}} \approx 2 \dots 5^\circ$), так как

$$\operatorname{tg} \alpha_{\bar{b}e} = \operatorname{tg} \alpha_b \sin \alpha_e ;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\bar{b}i} = \operatorname{tg} \alpha_b \sin \alpha_i .$$

Переточка резцов производится по передней поверхности. При этом сохраняется профиль боковых режущих кромок и постоянство углов профиля α_e и α_i .

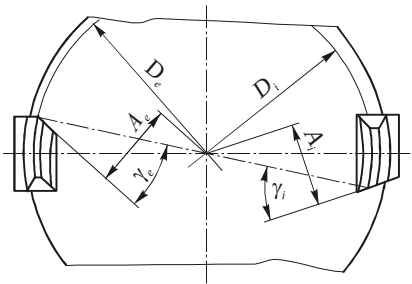


Рис. 11.13. Углы зуборезной головки

Нерабочая сторона резца выполняется с углом профиля, меньшим на 1° угла профиля резца другой формы, то есть для наружного резца $\alpha'_e = \alpha_i - 1^\circ$, а для внутреннего - $\alpha'_i = \alpha_e - 1^\circ$.

Определение углов профиля резцов головки. Номера резцов.

Для правильного сопряжения колес конической передачи с криволинейными зубьями необходимо обеспечить равенство углов зацепления α_0 на обеих сторонах зуба производящего колеса, роль которого выполняют внутренний и наружный резцы. Необходимо обеспечить также равенство углов наклона линий зубьев β_n производящего и обрабатываемого колес.

Как указывалось выше, при нарезании колес методом обката в качестве производящего колеса принимается плосковершинное колесо (рис.11.14), у которого образующая начального конуса лежит ниже плоскости OE , которая перпендикулярна оси колеса, на величину угла ножки зуба θ_f , а по плоскости OE перемещаются вершинные режущие кромки резцов. Для того, чтобы найти углы профиля боковых режущих кромок этих резцов построим профиль зуба производящего колеса в

сечении $A-A$ (рис.11.14). Здесь углы профиля α_e и α_i отсчитываются между линиями профиля и перпендикуляром к плоскости OE , а угол α_0 - между линией профиля и перпендикулярами к образующей начального конуса. Поэтому зуб образующего колеса в сечении $A-A$ (рис.11.14,б) получается несимметричным, так как $\alpha_i \neq \alpha_e \neq \alpha_0$. У внутреннего резца, обрабатывающего выпуклую сторону зуба колеса, угол профиля $\alpha_i = \alpha_0 + \Delta\alpha$, а у наружного резца, обрабатывающего вогнутую сторону - $\alpha_e = \alpha_0 - \Delta\alpha$. Как видно из рис.11.14,а, угловая поправка $\Delta\alpha = \theta_f$, так как стороны, ограничивающие эти углы, взаимно перпендикулярны.

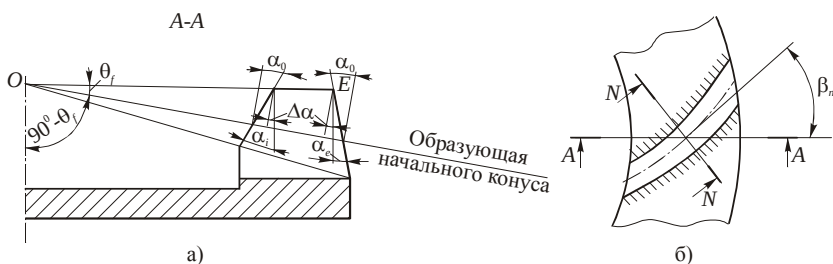


Рис.11.14. Схема определения углов профиля резцов зуборезной головки двухстороннего резания: а – углы профиля зуба производящего плосковершинного колеса; б – впадина криволинейного зуба

Углы профиля в сечении $N-N$ для колес с криволинейным зубом и углом наклона $\beta_n > 0$ найдем, умножив угловую поправку $\Delta\alpha$ на $\sin\beta_n$. Тогда у резцов обоих типов углы профиля:

$$\alpha_i = \alpha_0 + \theta_f \sin\beta_n;$$

$$\alpha_e = \alpha_0 - \theta_f \sin\beta_n.$$

Углы θ_f у колеса и шестерни могут отличаться по своей величине, поэтому с целью сокращения номенклатуры резцов при расчете поправки $\Delta\alpha$ берут ее среднее арифметическое значение, то есть принимают:

$$\Delta\alpha = \pm \frac{\theta_{f1} + \theta_{f2}}{2} \sin\beta_n,$$

где θ_{f1} и θ_{f2} - углы ножки зуба шестерни и колеса, нарезанных от одного производящего колеса.

В этом случае ошибка в расчетах углов зацепления неизбежна, но обычно она не превышает 2...3%. Характер сопряжения при этом не изменится, так как оба колеса будут нарезаны с одним и тем же углом зацепления, хотя и несколько отличающимся от теоретического.

Для удобства расчетов и уменьшения номенклатуры резцов разработана система номеров резцов, по которой угол профиля каждого номера отличается на $10'$, то есть принято, что каждому номеру соответствует поправка $\Delta\alpha = N \cdot 10'$. Следовательно, номер резца можно определить по формуле

$$N = \pm \frac{\Delta\alpha}{10'} = \pm \frac{\theta_{f1} + \theta_{f2}}{2 \cdot 10'} \sin \beta_n.$$

Тогда, например, для резца №6 угловая поправка $\Delta\alpha = 6 \cdot 10'$, а углы профиля, соответственно, внутреннего и наружного резцов при $\alpha_0 = 20^\circ$: $\alpha_i = 21^\circ$, $\alpha_e = 19^\circ$.

Номера резцов нормализованы. В метрической системе по ГОСТ 11905-76 установлено 16 номеров (0...42) для чистовых зуборезных головок и 5 номеров (0...24) – для черновых головок.

Равенство углов наклона линии криволинейного зуба β_n у производящего и нарезаемого колес достигается установкой головки на люльке с необходимыми координатами центра оси ее вращения O_u относительно центра люльки O . Как следует из рис. 11.11,б, координаты точки O_u :

$$H = L - r_0 \sin \beta_n;$$

$$V = r_0 \cos \beta_n,$$

где L - длина образующей начального конуса; r_0 - номинальный радиус зуборезной головки.

При настройке большинства моделей станков принято задавать положение центра вращения головки в полярных координатах. Тогда радиус центра смещения головки $U = \sqrt{H^2 + V^2}$, а полярный угол $q = \arctg V / H$.

Зуборезные головки двухстороннего резания применяют как на чистовых, так и на черновых операциях. В условиях мелкосерийного производства при нарезании зубьев модулем $m_n < 2,5$ мм такие головки

используют для изготовления колес и шестерен из цельных заготовок за две операции.

Достоинствами этих головок являются высокая производительность и универсальность, а недостатком – постоянство ширины впадины между зубьями и, соответственно, переменность толщины нарезаемых зубьев по их длине. Это приводит к снижению прочности колес и точности зубчатых передач. Исправить указанные недостатки при чистовой обработке зубьев колес модулем $m_n > 2,5$ мм можно путем изменения наладок операций, расчет которых описан в [6].

Большую точность при чистовой обработке обеспечивают **зуборезные головки одностороннего резания**, у которых имеются только внутренние или только наружные зубья, обрабатывающие одну сторону зубьев. За счет изменения параметров установки на люльке станка и диаметральных размеров головки можно регулировать ширину впадины и, соответственно, толщину нарезаемых зубьев. Последняя влияет на их прочность и обеспечивает необходимое пятно контакта передачи. Такими головками, как правило, обрабатывают только зубья шестерен (z_1).

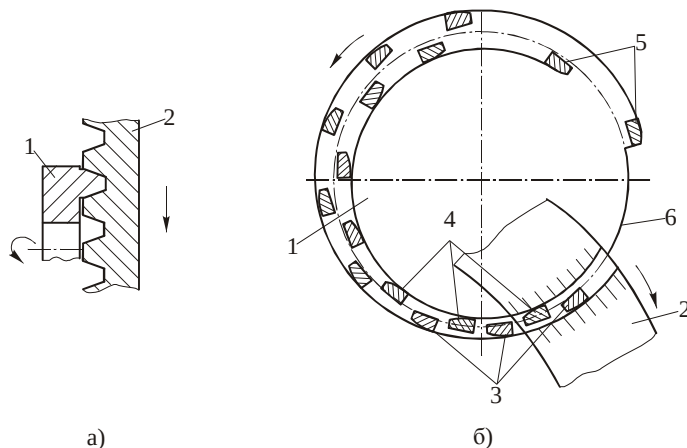


Рис. 11.15. Нарезание головкой-протяжкой криволинейных зубьев конических колес:
а – схема резания; б – головка-протяжка

Для чистовой обработки зубьев колес (z_2) полуобкатных передач в условиях крупносерийного и массового производства применяют головки-протяжки (рис.11.15), которые работают по методу копирования. При этом заготовка колеса 2 во время нарезания одной впадины непод-

вижна, а головка-протяжка 1, вращаясь вокруг своей оси, благодаря последовательному изменению радиального положения резцов, за один оборот одновременно обрабатывает обе стороны зуба колеса. Радиус положения наружных резцов 3 при этом равномерно возрастает, а внутренних резцов 4 – уменьшается. Первые режущие зубья устанавливают с небольшим угловым шагом, а последние калибрующие зубья 5 – с увеличенным шагом. Это делается с целью повышения точности обработки при меньшем количестве резцов, одновременно снимающих припуск. Когда протяжка подходит к заготовке своим безрезцовым участком 6 происходит деление колеса на один зуб. Профиль нарезанных зубьев прямолинейный, поэтому такой способ обработки применим только для передач с передаточным отношением $u = 2,5...10$. Обработка производится на специальных зубопротяжных станках моделей 5С272Е, 5281Б и др. и фирмы Глисон (США). Головки-протяжки обеспечивают повышение производительности (в 3...5 раз) по сравнению с обработкой на станках, работающих методом обката, а также повышение точности (на 10...20%) за счет жесткого крепления резцов (без подкладок) и малого припуска на обработку, равного 0,02...0,04 мм.

После чистовой обработки зубьев колес производится их контроль по пятну контакта, которое является основным критерием качества и работоспособности передачи. Теоретически контакт сопряженных колес должен быть точечным, перемещающимся по образующей начального конуса. Однако на практике из-за упругих свойств материала колес контакт имеет вид пятна. Его определяют по краске при обкатке на контрольно-обкаточных станках с применением относительно небольшой нагрузки. Пятно контакта должно быть сплошным, овальным или прямоугольным. Его длина должна составлять не более 50...70% длины зуба, а ширина – 0,6...1,0 рабочей высоты зуба. Большая ось пятна контакта должна совпадать с образующей начального конуса (рис.11.16,а,б). Не допускается выход пятна на кромки зуба и его диагональное расположение по длине зуба (рис.11.16,в). Подгонку пятна контакта обычно выполняют после проведения расчетов и регулировки наладки чистовой операции обработки шестерни (z_1), так как она имеет меньшее число зубьев и нужные результаты достигаются быстрее.

Другим критерием оценки качества передачи является шум при высоких окружных скоростях. Уровень шума зависит от качества обработки поверхностей зубьев, погрешностей изготовления колес и сборки передачи, а также конструкции колес.

Для чернового нарезания зубьев применяют зуборезные головки двух- и трехстороннего резания. Это наиболее трудоемкая операция, так

как она протекает в условиях работы с ударами, при снятии больших припусков (до 80% удаляемого материала) и, соответственно, с большими нагрузками. Из-за низкой стойкости резцов увеличиваются затраты на смену, заточку инструмента и наладку станков. Поэтому на черновых операциях обычно занято в 2...3 раза больше станков, чем на чистовых операциях.

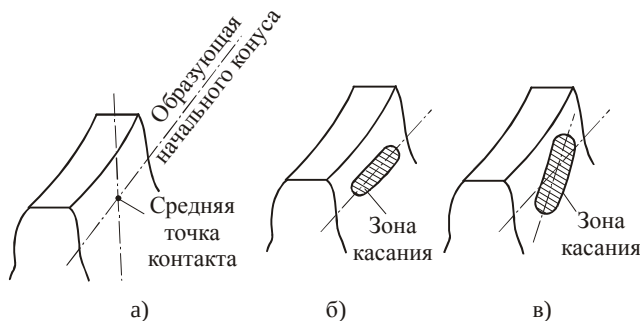


Рис. 11.16. Пятно контакта криволинейных зубьев конических колес:
а, б – большая ось пятна контакта совпадает с образующей начального конуса;
в – диагональное расположение большой оси пятна контакта

Головки двухстороннего резания, применяемые для чернового зубонарезания, отличаются от рассмотренных выше тем, что они регулируются по диаметральным размерам только подкладками, так как клинья у них, как правило, отсутствуют. Кроме того, для восприятия возросших осевых нагрузок на резцы с целью предотвращения их сдвига на заднем торце головки устанавливают опорное кольцо. Такие головки применяют в массовом и крупносерийном производствах для нарезания зубьев по методу обката.

Головки трехстороннего резания применяют для повышения производительности процесса зубонарезания (рис.11.17,а). В отличие от головок двухстороннего резания, у них к внутренним 1 и наружным 2 резцам добавлены средние резцы 3, которые установлены поочередно. При этом средние резцы обрабатывают только дно впадины и их количество равно половине общего числа резцов в головке. По высоте они имеют превышение вершинных режущих кромок на 0,2...0,25 мм, благодаря которому облегчается работа внутренних и наружных резцов (рис.11.17,б). Такие головки работают только по методу копирования, то есть при выключенном движении обката, в условиях массового и

крупносерийного производств, при разводе резцов $W > 1,8$ мм. Они применяются, главным образом, при нарезании зубьев колес (z_2) полуобкатных передач. Головка при этом работает только по способу врезания, то есть с подачи вдоль оси.

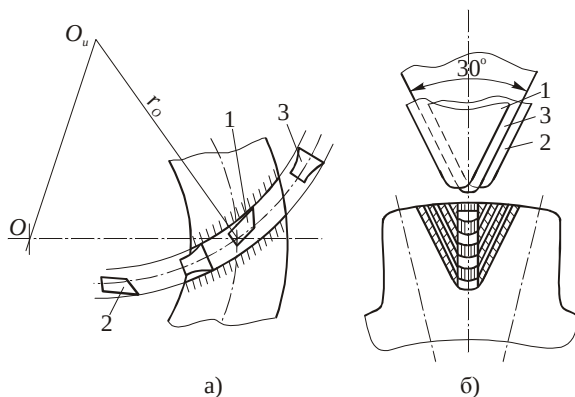


Рис.11.17. Нарезание зубьев конических колес черновыми головками трехстороннего резания: а – схема нарезания зубьев; б – распределение припуска между зубьями

Для нарезания зубьев шестерен (z_1) и колес (z_2) обкатных передач и шестерен полуобкатных передач модулем $m_n > 2,5$ мм из целой заготовки за один установ применяют также комбинированный метод. В этом случае предварительно осуществляется нарезание впадины почти на полную глубину врезанием без обката, а в конце обработки включают механизм обката и производят чистовую обработку зубьев. Благодаря этому методу повышается производительность процесса зубонарезания.

Конструкции зуборезных головок и методы зубонарезания конических колес постоянно совершенствуются в следующих направлениях: 1) повышение жесткости корпусов и способов крепления резцов в головке и крепления головки на станке; 2) изменение схемы резания; 3) применение станков для нарезания зубьев с непрерывной обкаткой; 4) повышение стойкости инструмента за счет замены затылованных резцов остроконечными; 5) создание головок с резцами, оснащенными твердым сплавом (обеспечивает повышение производительности в 2...2,5 раза); 6) уменьшение числа головок, их наладок, резцов, подкладок и других сменных деталей; 7) изменение в необходимых случаях конструкции и параметров колес и зуборезных инструментов.

Следует отметить, что повышение качества обработки зубьев термически обработанных колес достигается последующим зубошлифованием, а также притиркой с вводом абразивной жидкости в зону контакта и другими способами (см.гл.13).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Виды конических передач и области их применения. Основные параметры конических зубчатых колес. Формы зубьев и их применение.
2. В чем различие исходных плоских и плоско-вершинных образующих колес?
3. Назовите методы нарезания зубчатых конических колес и инструменты для их реализации?
4. В чем суть метода нарезания прямозубых конических колес строганием? Опишите конструкции применяемого инструмента.
5. Фрезерование зубьев конических колес дисковыми фрезами. Схемы резания и конструкция фрез.
6. Каким образом осуществляется и какие преимущества дает применение протягивания при изготовлении прямозубых конических колес? Схема резания и устройство круговых протяжек.
7. Как работают резцовые головки при нарезании криволинейных зубьев конических колес?
8. Устройство сборных зуборезных резцовых головок. Их основные детали и геометрические параметры резцов.
9. Система номеров резцов зуборезных головок. Как определить номер резца, если известны углы ножек нарезаемой пары конических колес θ_f ?
10. Чем полуобкатные конические передачи отличаются от обкатных передач? Какими методами и инструментами нарезают криволинейные зубья их колес?
11. В чем заключается контроль зубчатых передач с криволинейными зубьями?
12. Устройство и схема резания головкой-протяжкой при чистовой обработке конических колес с криволинейными зубьями?
13. Типы зуборезных головок для черновой и чистовой обработки криволинейных зубьев конических колес. В чем различие их конструкций и схем резания?

12. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

12.1. Виды автоматизированных производств и основные требования к инструментам, применяемым в них

Автоматизация машиностроительного производства, получившая широкое распространение в мире, имеет следующие цели: повышение производительности, снижение себестоимости изделий и гибкости производства при частой смене номенклатуры изделий.

На первом этапе первые две цели достигались путем применения станков-автоматов, полуавтоматов и автоматических линий, используемых для изготовления одного вида изделий. Такие станки с жестким программированием применялись только в крупносерийном и массовом производствах.

Важные достижения в области электроники, электротехники и станкостроения в последние годы позволили создать автоматизированные станки с числовым программным управлением (ЧПУ), которые стали широко применять в серийном и даже мелкосерийном производствах, так как они позволили добиться не только повышения производительности, но и гибкости производства путем быстрой смены управляющих программ на станках. Благодаря использованию системы ЧПУ были созданы многооперационные станки (обрабатывающие центры), на которых стало возможным обрабатывать детали за одну установку при автоматической смене большего числа инструментов, устанавливаемых в магазинах станков.

Комплексы из таких станков позволили достичь высшей степени автоматизации – создания гибких производственных систем (ГПС), обеспечивающих выпуск изделий широкой номенклатуры при минимальном числе работающих. Благодаря этому была реализована идея так называемой «безлюдной технологии».

Использование автоматизации сопровождалось резким увеличением стоимости станко-часа, а соответственно, и себестоимости изделия. По-

этому потребовалось проведение множества мероприятий по ее снижению, в том числе за счет интенсификации режимов резания, совершенствования технологических процессов, разработки специальной инструментальной оснастки, включающей в себя режущий и вспомогательный инструменты (табл. 12.1).

Т а б л и ц а 12.1

Требования к инструментальной оснастке, применяемой в автоматизированном производстве, и мероприятия, обеспечивающие их выполнение

№ п/п	Требования к инструментальной оснастке	Мероприятия, обеспечивающие выполнение требований к инструментальной оснастке
1	Сокращение времени простоев станков при установке, смене и настройке инструментов на размер	Применение подсистем вспомогательных инструментов, обеспечивающих автоматическую смену инструментов; настройка инструментов на размер вне станка; автоматическое точное и жесткое крепление инструментов на станке
2	Высокая производительность обработки заготовок широкой номенклатуры	Применение наиболее совершенных инструментальных материалов, новых, более прочных твердых сплавов, керамики, эльбора и алмазов; нанесение износостойких покрытий на СМП, применяемых взамен напайных пластин и др.
3	Высокая размерная стойкость инструментов, уменьшающая частоту их смены	Выбор более износостойких инструментальных материалов и оптимальных режимов резания; применение инструментов с автоматической поднастройкой на размер в процессе резания, осуществляемой по сигналу контрольных устройств, встроенных в станок
4	Концентрация операций и переходов, позволяющая сократить вспомогательное время и повысить точность обработки	Использование комбинированных инструментов
5	Снижение затрат на проектирование и изготовление инструментальной оснастки	Использование метода агрегатно-модульного проектирования сборных инструментов

Было создано новое научное направление в проектировании инструментальной оснастки для автоматизированного производства, в результате чего произошло четкое разделение режущего и вспомогательного инструментов, объединяемых при сборке в инструментальные блоки, а затем и в инструментальные системы для оснащения отдельных типов станков.

12.2. Режущие инструменты, применяемые в автоматизированном производстве

Номенклатура режущих инструментов, применяемых в автоматизированном производстве, практически совпадает с применяемой на универсальных станках. Однако к этим инструментам предъявляются более жесткие требования по точности размеров, формы и качеству заточки, оформленные в виде специальных стандартов.

Во вновь разработанных конструкциях режущих инструментов широко используются СМП не только в резцах, но и сверлах, комбинированных инструментах, фрезах и др.

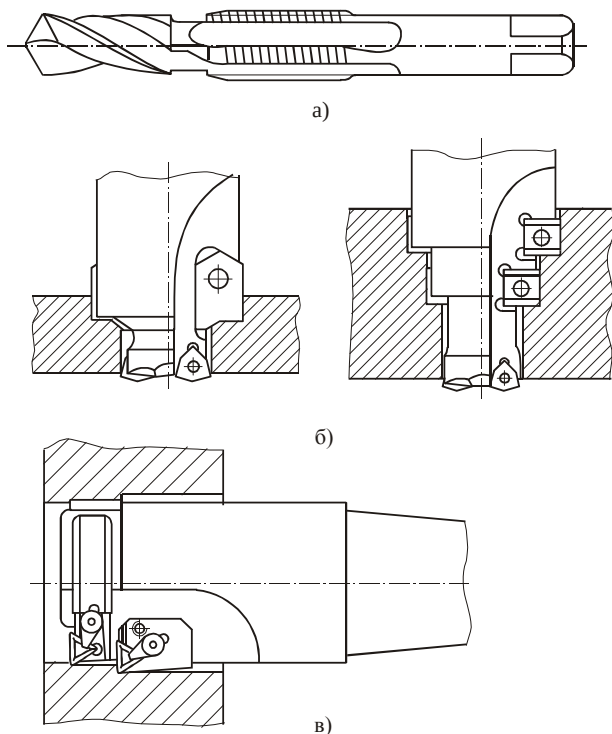


Рис.12.1. Комбинированные инструменты: а – сверло-метчик; б – сверло-зенкер; в – расточная оправка, оснащенная твердосплавными СМП

Для обработки отверстий широкое применение нашли перовые сверла, позволяющие быстро изменять диаметр за счет замены пластин, закрепляемых винтами в жестких оправках, а также твердосплавные сверла с внутренним подводом СОЖ, оснащенные СМП.

Для сокращения числа переходов используются комбинированные инструменты: ступенчатые сверла, зенкеры-развертки, сверла-метчики (рис. 12.1, *а*) и др. и даже целые агрегаты в виде корпусов сложной формы, оснащенных большим числом СМП, каждая из которых обрабатывает определенную поверхность заготовки (рис. 12.1, *б*).

Для расточки ступенчатых отверстий применяются разнообразные многорезцовые расточные оправки с резцовыми вставками, оснащенными СМП (рис. 12.1, *в*).

При конструировании торцевых фрез агрегатно-модульный принцип используется за счет применения кассет, оснащенных СМП разной формы режущих кромок (см. гл. 8).

На горизонтально-фрезерных станках, встраиваемых в автоматические линии, применяют наборы фрез, закрепленных на одной оправке (рис. 12.2, *а*) и предназначенных для одновременной обработки нескольких поверхностей заготовки. За счет этого существенно повышается производительность, а также точность взаимного расположения обработанных поверхностей.

Для фрезерования по трем координатам на станках с ЧПУ используют комбинированную фрезу-сверло (рис. 12.2, *б*), у которой режущие кромки на торце подобны применяемым на спиральных сверлах и работают при осевой подаче, а режущие кромки на цилиндрической части работают, как у торцевых фрез при подаче по контуру.

Для обработки сложных фасонных поверхностей применяют концевые фрезы со сферической или радиусной формой режущих кромок (рис. 12.2, *в*).

С целью обеспечения быстроты смены инструмента и сокращения времени простоев оборудования настройка инструментов на размер осуществляется с помощью специальных приспособлений вне станка. Для этого режущие инструменты снабжаются регулируемыми элементами. Например, у резцов используют для этого винты со сферической головкой, ввинчиваемые с торца в державку (рис. 12.3, *а*), и после регулировки на размер L крепление в сменном резцовом блоке осуществляют с помощью клиньев и винтов.

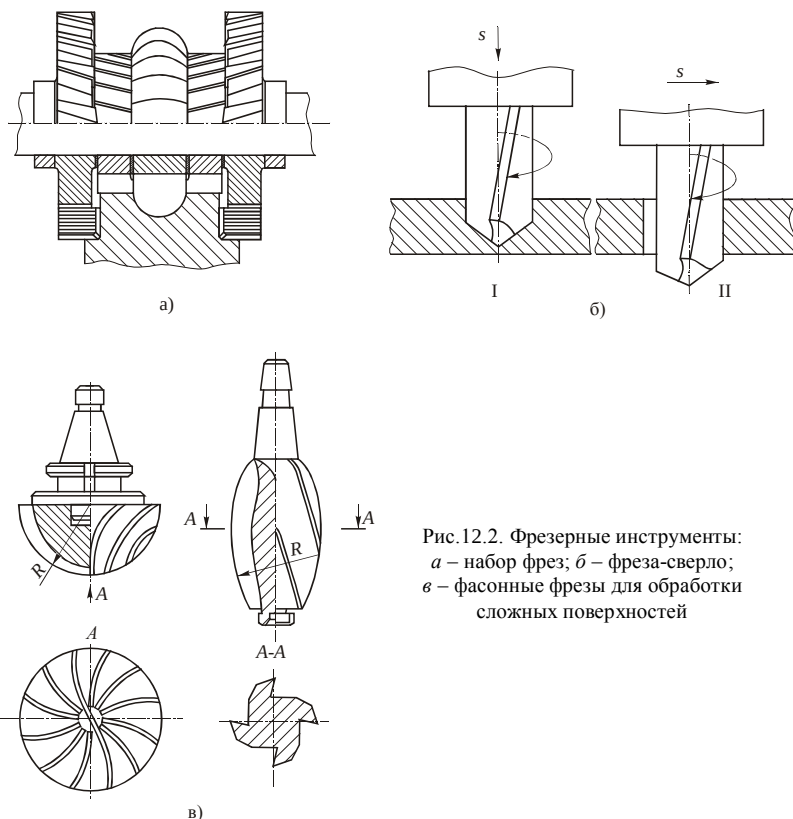


Рис.12.2. Фрезерные инструменты:
а – набор фрез; *б* – фреза-сверло;
в – фасонные фрезы для обработки
 сложных поверхностей

Для сокращения времени замены резцов используются различные устройства, одно из которых показано на рис.12.3, *б*. Здесь крепление резца *1* осуществляется подпружиненным клином *2*. Для замены резца достаточно рукояткой *3* сдвинуть тягу влево, и резец свободно снимается. Регулировка на размер здесь также осуществляется за счет самотормозящегося винта *4*, опирающегося на неподвижную опору *5*, установленную в корпус *6*.

Бесподналадочная замена осевых инструментов (сверл, зенкеров, разверток и т.д.) достигается с помощью регулировочных винтов (рис. 12.3, *в*) или регулировочных гаек (рис. 12.3, *з*), позволяющих изменять вылет инструмента *L*. Крутящий момент в обоих примерах воспринимается шпонкой *1*, а зажим осуществляется винтом *2*, упирающимся в скошенную лыску на хвостовике.

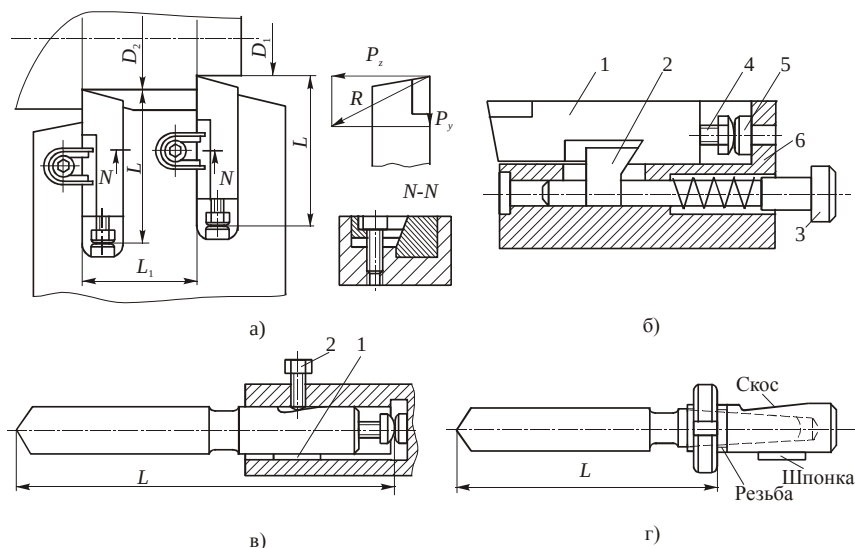


Рис.12.3. Устройства для бесподналадочной замены: а, б – резцов; в, г – осевых инструментов

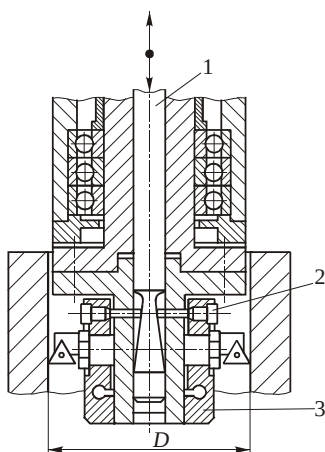


Рис. 12.4. Расточная оправка с автоматической поднастройкой на размер

При конструировании быстросменных наладок инструментов во избежание раскрепления при переменных нагрузках необходимо использовать направления составляющих силы резания таким образом, чтобы они прижимали державки к опорным поверхностям блока, а не к элементам для регулировки и крепления (рис. 12.3, а).

Для повышения размерной стойкости инструментов, которая по величине меньше стойкости до полного износа инструмента, когда процесс резания становится невозможным, применяют самые различные устройства для автоматической поднастройки инструмента на размер в процессе работы. Один из примеров

такого устройства схематично представлен на рис. 12.4. Измерительное устройство станка контролирует размер отверстия и при его приближении к границам допуска дает команду на осуществление поднастройки. При этом тяга 1 с конической частью перемещается вдоль оси и через стержни 2 разжимает упругие элементы резцовой головки 3, регулируя, таким образом, диаметр расточки D .

В настоящее время для обрабатывающих центров создаются так называемые «интеллектуальные» режущие инструменты, у которых регулирование положения режущих кромок осуществляется с помощью элементов мехатроники*.

Существенно сокращает простои станков с ЧПУ автоматическая смена инструментов с помощью манипуляторов. Для этого инструменты должны иметь специальные устройства для захвата и специальные патроны для автоматического крепления на станке. Поэтому инструментальная оснастка таких станков имеет весьма развитую подсистему вспомогательных инструментов.

12.3. Вспомогательные инструменты

Вспомогательные инструменты – это различного вида резцедержатели, патроны, оправки, удлинители и переходники, специальные блоки и др. Они позволяют существенно расширить область применения режущих инструментов и обеспечить его эксплуатацию в автоматическом режиме, а за счет унификации – сократить номенклатуру специальных инструментов и осуществить агрегатно-модульный принцип их конструирования.

Унификация отдельных элементов режущих и вспомогательных инструментов позволила создать инструментальные системы для оснащения станков с ЧПУ и ГПС, которые могут быстро и просто перенастраиваться при смене номенклатуры изготавливаемых деталей. При этом вспомогательные инструменты должны: 1) обеспечивать высокие точность и надежность установки режущих инструментов на станке; 2) обеспечивать быстросменность инструментов; 3) расширять номенклатуру инструментальной оснастки за счет применения сборных инструментов из унифицированных элементов.

* Мехатроника – современное направление развития науки и техники, базирующееся на использовании достижений точной механики, электроники и электротехники, для создания комплектных интегрированных интеллектуальных систем движения рабочих органов машин и средств управления ими (Ю.П. Богачев)

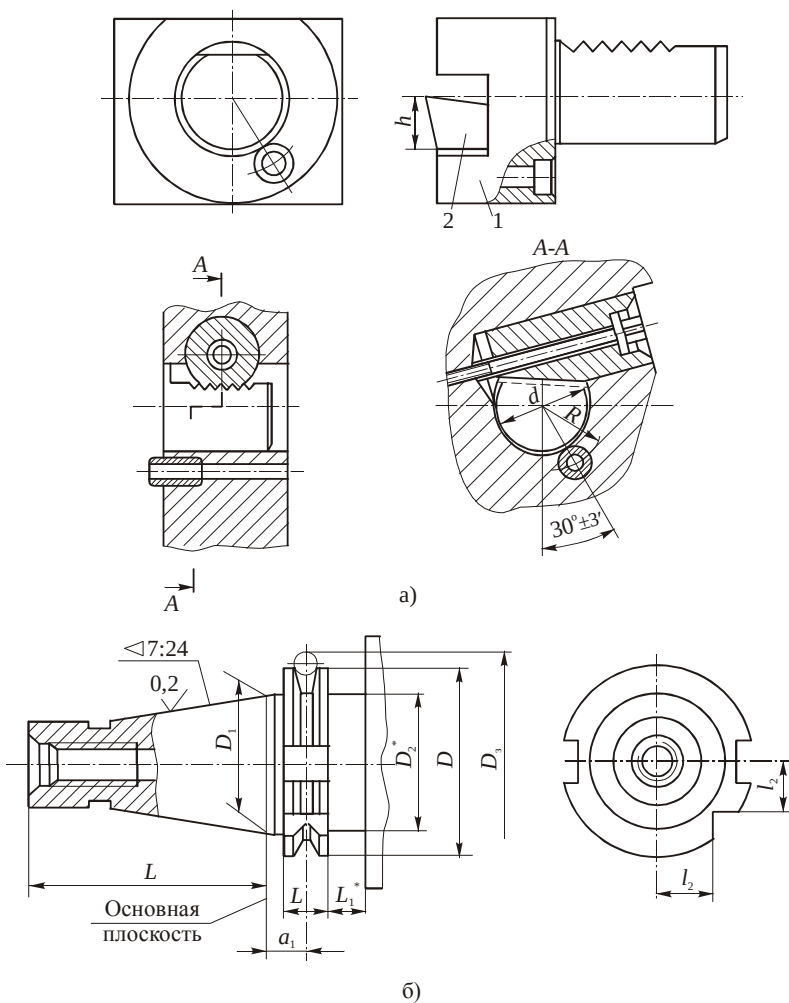


Рис. 12.5. Вспомогательные инструменты: *а* – резцедержатель с цилиндрическим хвостовиком; *б* – патрон с коническим хвостовиком 7:24

Наибольшее число конструкций вспомогательных инструментов разработано для многооперационных станков с ЧПУ, которые можно условно разделить на станки токарной группы, применяемые для обработки тел вращения, и станки сверлильно-фрезерно-расточной группы, применяемые для обработки корпусных деталей.

У станков первой группы инструменты крепятся или в револьверных головках, или на суппортах чаще всего с помощью держателей с цилиндрическим хвостовиком, имеющим рифленую лыску (рис.12.5, *а*). Для крепления различных типов резцов державки имеют открытые или закрытые пазы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Держатели для осевого инструмента и переходных втулок на конце имеют цилиндрический выступ с отверстиями конической или цилиндрической формы. Крепление самих держателей на станке осуществляется рифленым клином.

На станках второй группы чаще всего используют патроны с коническим хвостовиком с конусностью 7:24 и внутренним отверстием: цилиндрическим, коническим (типа Морзе) или укороченным. Для передачи крутящего момента применяют торцевые шпонки, винты, цанги, самотормозящиеся конусы Морзе и др.

Унифицированный хвостовик таких патронов показан на рис.12.5, *б*. Конус 7:24 обеспечивает хорошее центрирование, беззазорное соединение со шпинделем и позволяет манипулятором легко извлекать и вставлять в шпиндель станка патрон с инструментом. При этом для обеспечения манипулятором надежного захвата на фланце патрона предусмотрены канавка трапецидальной формы и два шпоночных паза, а для ориентации инструмента относительно этих пазов – вырез под углом 90°.

В шпиндель хвостовик патрона затягивается либо винтом, либо удерживается там специальным устройством с помощью тяги и тарельчатых пружин.

Недостатком патронов с хвостовиком 7:24 являются большие габариты и масса, а также отсутствие опоры по торцу шпинделя. Поэтому в последнее время ведутся работы по замене конуса 7:24 на крепление с базированием по цилиндрической поверхности и торцу. Благодаря этому достигается большая динамическая жесткость с одновременным гашением вибраций на торцевых стыках.

Такой же принцип базирования используется и при сборке инструментальных блоков, состоящих из режущего и вспомогательного инструментов. При этом цилиндрические поверхности должны быть длиной не менее диаметра. Торцевое биение этих поверхностей должно быть не более 1...3 мкм, а радиальное – не более 3...5 мкм.

Некоторые схемы таких соединений показаны на рис.12.6. При соединении с односторонним прижимом винтами может быть использована схема с внутренним (рис.12.6, *а*) или наружным (рис.12.6, *б*) креплением инструмента 1 на оправке 2. Для создания натяга по торцу воз-

можны варианты (рис.12.6, в, г) с использованием резьбового соединения. Возможно использование более простого варианта (рис. 12.6, д) крепления винтом со смещенной осью.

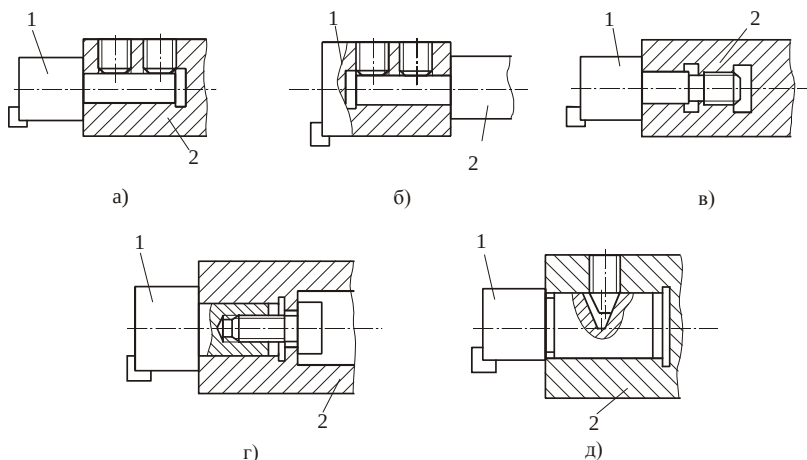


Рис.12.6. Схемы соединений сменного инструмента: 1 – инструмент; 2 – оправка

Агрегатно-модульный принцип проектирования сборных инструментальных блоков можно проиллюстрировать примером создания инструментов для расточки отверстий (рис. 12.7). Здесь соединение блока со шпинделем осуществляется с помощью патрона 1 с конусом 7:24. Затем следует удлинитель 2 с увеличенным диаметром для повышения жесткости оправки, далее – переходники 3 для настройки по длине и на конце расточная головка 4.

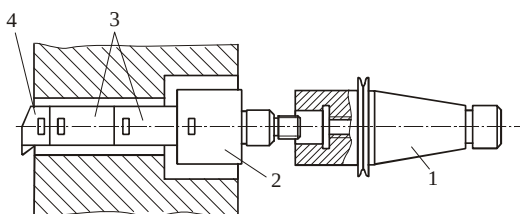


Рис.12.7. Инструментальный расточной блок из стандартных модулей: 1 – патрон; 2 – удлинитель; 3 – переходник; 4 – расточная головка

В качестве элементов вспомогательного инструмента также используются переходные втулки, различные державки и оправки, цанговые и трехлапчатые патроны и др. Вспомогательные инструменты изготавливают из стали 18ХГТ с цементацией и

закалкой до *HRC*, 53...57, что обеспечивает их высокую долговечность. При этом допускаемое биение оправки, установленной в патроне, относительно хвостовика должно быть не более 5...10 мкм.

Недостатком сборных инструментальных блоков является их пониженные жесткость и точность по сравнению с цельными инструментами – причем тем большая, чем больше сборных элементов в блоке. Для увеличения точности блоков прибегают к использованию элементов для регулирования размеров режущих инструментов.

12.4. Система инструментальной оснастки для станков с ЧПУ и ГПС

Для автоматизированных станков из собираемых инструментальных блоков были созданы системы инструментальной оснастки, позволяющие обрабатывать сложные детали мелкими сериями при автоматической смене инструментов, предварительно установленных в специальных магазинах.

Эти системы состоят из двух подсистем: режущего и вспомогательного инструментов, отличающихся конструктивными особенностями, которые зависят от типа оборудования и вида обрабатываемого изделия.

На рис.12.8 показан пример оснащения **станков с ЧПУ токарного типа** вспомогательным и частично режущим инструментом. Держатели с рифленой лыской (рис.12.5,*а*) крепятся клином в револьверных головках с базированием по цилиндрической поверхности и торцу. В головках держателей предусмотрены открытые или закрытые взаимно перпендикулярные пазы (1...9) для крепления резцов различных типов (проходных, отрезных и др.) с разной длиной державки и направлением относительно оси крепежного отверстия. Резцедержатели имеют правое и левое исполнение и применяются в зависимости от расположения револьверной головки и направления вращения шпинделя.

Переходная втулка 10 позволяет закреплять режущий инструмент или вспомогательные элементы круглого сечения диаметром 16...40 мм. Для обработки отверстий используется перовое сверло 11 с непосредственным креплением в держателе. В вариантах 12 и 13 предусмотрены отверстия с конусом Морзе для крепления трехкулачкового патрона 19 и режущих инструментов осевого типа (сверла, зенкеры, развертки и т.п.). Растачивание отверстий можно производить либо резцами, закрепляемыми в резцедержателях 1...9, либо с помощью расточных оправок 14, 15. Вариант 16 может использоваться для крепления метчиков М6...М27 в патроне. Варианты 17, 18 представляют собой переходные втулки со шпоночным пазом. Они позволяют крепить расточную бор-

штангу 20, патрон для метчиков 21, концевые режущие инструменты с укороченным конусом Морзе 22. Эти втулки являются связующим звеном со **станками сверлильно-фрезерно-расточной группы**.

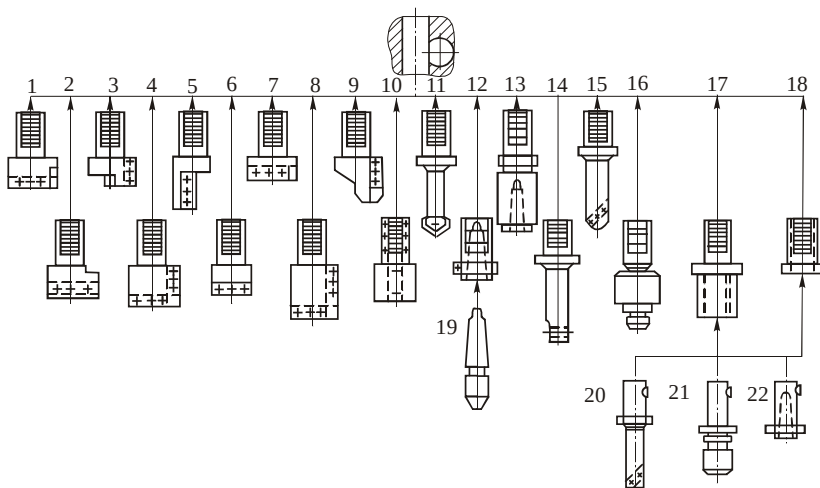


Рис.12.8. Система инструментальной оснастки для станков с ЧПУ токарной группы

Для этих станков инструментальные системы строятся аналогичным образом. Только в качестве элемента крепления на станке используются патроны с хвостовиками 7:24 или с конусом Морзе. В качестве примера на рис.12.9 показаны небольшая часть этой системы и некоторые способы крепления разных по назначению режущих инструментов: торцевая фреза, осевой инструмент, расточная оправка. Для передачи крутящего момента фланец патрона с конусом 7:24 имеет пазы, в которые входят торцевые шпонки шпинделя станка. Смена инструментов производится автоматически по программе с помощью манипуляторов (автооператоров), которые передают инструментальные блоки из магазина в шпиндель и обратно.

Оборудование, предназначенное для условий «безлюдной технологии», оснащается системами контроля над работой станков, состоянием режущего инструмента, точностью размеров и т.д. Оно обеспечивает по команде компьютера поиск и автоматическую смену инструментов. Станки, входящие в такую систему, имеют инструментальные магазины большой емкости (до 60 штук и более на один станок), в которых устанавливаются инструменты, необходимые по ходу технологического

процесса, а также инструменты-дублеры, обеспечивающие непрерывную работу в течение заданного периода времени.

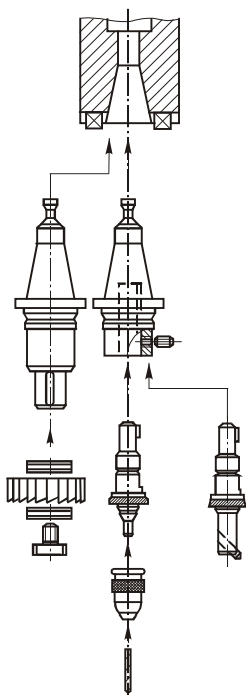


Рис.12.9. Принцип построения системы инструментальной оснастки для станков с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы

Рассмотренные выше системы инструментальной оснастки для станков с ЧПУ оказались громоздкими и требовали больших затрат ручного труда при настройке на размер. Необходимо было сократить до минимума число элементов вспомогательных инструментов и создать более компактные конструкции режущих инструментов.

Рядом зарубежных фирм были разработаны различные инструментальные системы для ГПС. Одно из таких решений для станков токарной группы создано фирмой «Sandvik Coromant» (Швеция) (рис.12.10). Оно представляет собой компактные сменные режущие головки, оснащенные СМП и используемые для всех видов токарной обработки. В укороченном хвостовике такой головки имеется отверстие, выступ и паз. Головки 1, оснащенные СМП, устанавливаются на державке 2, имеющей специальное устройство для их крепления. Под действием силы, приложенной к тяге 3, выступы на хвостовике упруго деформируются и образуется жесткое соединение головки с

державкой. Точное позиционирование головки создается за счет базирования по торцу, двум боковым поверхностям выступов державки и опорной нижней поверхности. Усилие зажима осуществляется в узле крепления пакетом тарельчатых пружин, а освобождение головок – их расжатием с помощью гидроцилиндра.

Кроме резцов (рис.12.10,а), инструментальные головки оснащаются и другими видами режущих инструментов, а также патронами для крепления сверл, метчиков и т.п. (рис.12.10, б, в).

Точность положения вершины режущей кромки при повторной установке головок составляет ± 2 мкм по длине и ± 5 мкм по высоте. При-

менение головок позволяет уменьшить массу инструментов примерно на 50%.

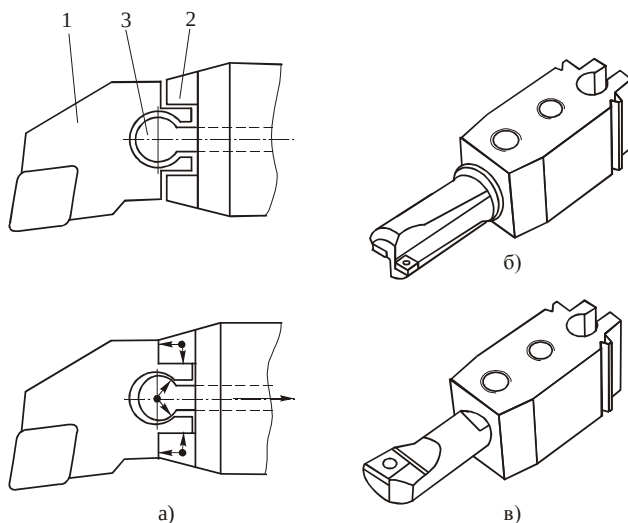


Рис.12.10. Сменные режущие головки для токарной обработки:
а – схема крепления головки; *б* – патрон для крепления сверла;
в – патрон для крепления резца

Комплекты таких головок устанавливаются в магазинах барабанного типа, размещаемых около станков. Для их автоматического нахождения головки кодируются и заменяются по команде компьютера.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Основные требования к конструкциям режущих инструментов, применяемых в автоматизированном производстве. Как они реализуются?
2. Особенности конструирования вспомогательных инструментов для автоматизированного производства.
3. В чем заключается агрегатно-модульный принцип конструирования инструментальной оснастки для станков с ЧПУ и ГПС? Приведите примеры.

13. АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Абразивные инструменты – это режущие инструменты, изготовленные из зерен шлифовальных материалов, сцепленных между собой связующим веществом (связкой) и разделенных друг от друга порами.

В отличие от лезвийных инструментов абразивные инструменты не имеют сплошных режущих кромок, так как многочисленные абразивные зерна находятся на некотором расстоянии друг от друга. Зерна расположены хаотично и имеют неправильную геометрическую форму с отрицательными передними углами. Процесс резания абразивными инструментами заключается в срезании отдельными зернами-резцами тонкого слоя материала заготовки. При этом высокие твердость и теплоустойчивость абразивных зерен дают возможность обрабатывать очень твердые материалы на высоких скоростях резания.

В зоне контакта абразивных зерен и заготовки возникает высокая мгновенная температура ($1000...1600^{\circ}$), часто вызывающая на поверхности детали появление прижогов, остаточных напряжений и шлифовочных трещин. Иногда это является сдерживающим фактором повышения производительности процесса шлифования.

Абразивные инструменты классифицируют по следующим признакам: 1) геометрическая форма – шлифовальные круги, головки, сегменты, бруски, абразивные ленты и шкурки; 2) род абразивного материала – абразивные, алмазные, эльборовые и др.; 3) вид основы – жесткая (шлифовальные круги, головки, сегменты, бруски); гибкая (эластичные круги, абразивные ленты и шкурки); жидкая (пасты, суспензии).

13.1. Технические характеристики абразивных инструментов и основы выбора шлифовальных кругов

Абразивные инструменты на жесткой основе характеризуются формой и размерами, шлифовальным материалом, его зернистостью, связкой, твердостью, точностью, неуравновешенностью, а алмазные и эльборовые инструменты также и концентрацией зерен в рабочем слое.

Форма и размеры. Геометрические параметры абразивных инструментов задаются станком, на котором предполагается их использование, а также формой, размерами обрабатываемых поверхностей и характером движений инструментов.

Шлифовальные круги (рис.13.1,а) применяются в том случае, когда основное движение вращательное. Поэтому они представляют собой различные по форме тела вращения.

Кратко рассмотрим области применения кругов основных форм исполнения.

Плоские круги прямого профиля ПП применяют для круглого наружного, внутреннего и бесцентрового шлифования, для плоского шлифования периферией круга и для заточки инструментов. Плоские круги с двухсторонним коническим профилем 2П применяют для вышлифовывания зубьев шестерен и шлифования резьбы. Плоские круги с выточкой ПВ и с двухсторонней выточкой ПВД позволяют помещать в выточках зажимные фланцы, а благодаря этому, совмещать круглое шлифование с подрезкой торца. Эти круги применяют также в качестве ведущих кругов при бесцентровом шлифовании.

Цилиндрические и конические круги-чашки ЧЦ и ЧК применяют для заточки инструментов и для плоского шлифования торцем.

Тарельчатые круги Т применяют для заточки и доводки передних граней фрез, обработки зубьев долбяков и других инструментов.

Алмазные круги (рис.13.1,б) бывают плоского прямого профиля, чашечные, тарельчатые, дисковые и др. и применяются для заточки и доводки твердосплавных инструментов, а также для шлифования труднообрабатываемых и резки неметаллических материалов.

Эльборовые круги имеют формы, подобные алмазным кругам. Их применяют для шлифования закаленных сталей ($HRC_{\geq 60}$), чистовой заточки инструментов из быстрорежущих сталей, при чистовом шлифовании резьб, а также для обработки жаропрочных и коррозионностойких сталей.

Размеры шлифовальных кругов следует брать возможно большими, так как в этом случае улучшаются условия шлифования и снижается стоимость обработки. При этом верхний предел размеров круга ограничивается конструкцией и размерами станка, а иногда – размерами и формой обрабатываемой заготовки. Так, например, при шлифовании отверстий диаметр круга должен быть не более 0,7...0,9 диаметра обрабатываемого отверстия.

Шлифовальные головки (рис.13.1,в) – это шлифовальные круги небольшого диаметра (3...40 мм). Такие круги приклеивают к стальным

хвостовикам и применяют для внутреннего шлифования и для ручной зачистки заготовок с помощью шлифовальных машин.

Шлифовальные бруски (рис.13.1,г) используют в инструментах, совершающих возвратно-поступательное движение: при слесарных работах, а также при хонинговании или суперфинишировании. В последних случаях бруски закрепляют в специальных стальных головках.

Шлифовальные сегменты (рис.13.1,д) применяют для плоского шлифования. В этом случае шлифовальный круг состоит из нескольких сегментов, закрепленных в головке или патроне.

Шлифовальные шкурки – это абразивные инструменты на гибкой (бумага, ткань, металлическая лента) или комбинированной основе (бумага и ткань) с наклеенным на нее слоем шлифовального материала, закрепленного связкой. Шкурки выпускают в виде листов, лент и применяют для ручной и машинной зачистки и отделки деталей.

Основные размеры абразивных инструментов регламентированы нормативно-технической документацией.

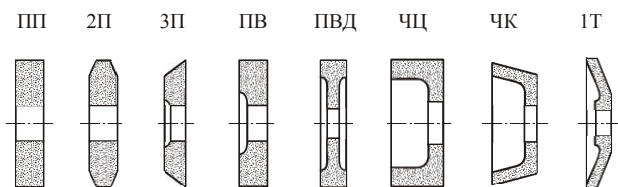
Шлифовальные материалы – это абразивные материалы (см.гл.1), подвергнутые сортировке, дроблению, измельчению и очистке от посторонних веществ. Они выбираются в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала и условий шлифования. Так, например, круги из электрокорунда белого применяют в основном при чистовой и отделочной обработке закаленных сталей, а также углеродистых, быстрорежущих, легированных и нержавеющей сталей.

Круги из электрокорунда нормального широко применяют на обдирочных и чистовых операциях обработки материалов, имеющих высокий предел прочности на растяжение.

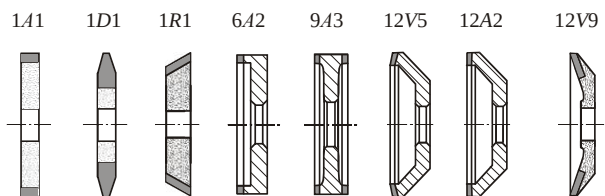
Абразивные инструменты из карбида кремния применяют в основном для обработки твердых и хрупких материалов, например, чугунов, бронз и т.д. Крупнозернистые круги из карбида кремния используют для обработки неметаллических материалов и правки шлифовальных кругов.

Круги из монокорунда используют чаще всего для получистовой и чистовой обработки средне- и высоколегированных сталей, подвергнутых хромированию, азотированию и закалке.

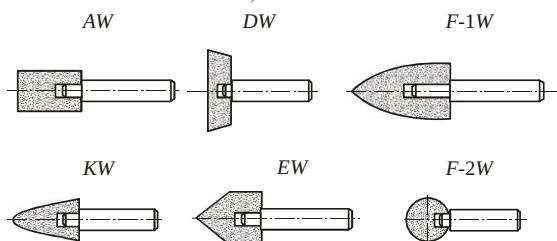
Круги из хромотитанистых электрокорундов используют на операциях, где имеется опасность появления прижогов или требуется высокая стойкость инструментов, особенно по сохранению профиля рабочей поверхности.



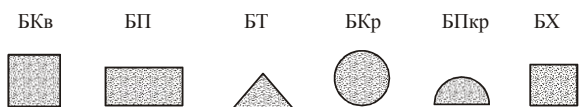
а)



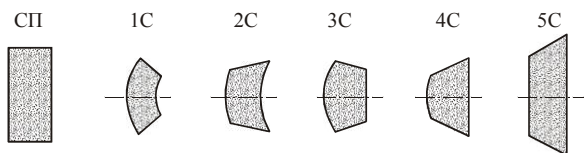
б)



в)



г)



д)

Рис.13.1. Некоторые типы абразивных инструментов: а – абразивные круги; б – алмазные и эльборовые круги; в – шлифовальные головки; г – шлифовальные бруски; д – шлифовальные сегменты

Для заточки и вышлифовки канавок инструментов из закаленных инструментальных сталей используют эльбор, а из твердых сплавов – синтетический алмаз.

Зернистость шлифовальных материалов. Совокупность абразивных зерен шлифовального материала в установленном интервале размеров называют *фракцией*, а преобладающую по массе, объему и числу зерен фракцию называют *основной фракцией*.

Условные обозначения, соответствующие размеру зерен основной фракции, называют *зернистостью*.

В зависимости от размера зерен шлифовальные материалы делят на четыре группы: 1) шлифзерно – 2500...160 мкм (номера от 200 до 16); 2) шлифпорошки – 160...40 мкм (от 12 до 4); 3) микропорошки – 63...10 мкм (от М63 до М14); 4) тонкие микрошлифпорошки – 10...3 мкм (от М10 до 5).

Алмазные материалы делят на шлифпорошки и микропорошки. Размер шлифпорошков находится в пределах от 630 до 40 мкм (по размерам ячеек верхнего и нижнего сита), а размер микропорошков – от 60 до 1 мкм и менее (контролируется на микроскопе). Зернистость алмазных порошков обозначается дробью, в которой числитель соответствует наибольшему размеру зерен основной фракции, а знаменатель – наименьшему размеру, например: 400/250, 250/160 и т.д.; алмазных микропорошков – 60/40, 40/28 и т.д.; эльборовых порошков – Л315/250 (Л25), Л250/200 (Л20) и т.д.

Зернистость абразивного круга зависит от вида шлифования, требуемой шероховатости и точности обработки, материала заготовки и снимаемого припуска. Чаще всего применяют абразивные круги средней зернистости 40...16, которые обеспечивают высокую производительность при требуемой шероховатости и точности обработки.

Номер зернистости круга увеличивают: для уменьшения опасности «засаливания» круга и появления прижогов на заготовке; при увеличении припуска на обработку; для увеличения производительности процесса шлифования; при увеличении скорости шлифовального круга; при переходе от кругов с керамической связкой на круги с бакелитовой или вулканитовой связками; при увеличении вязкости и уменьшении твердости материала заготовки; при уменьшении номера структуры круга.

При использовании алмазных кругов рекомендуется брать: для предварительного шлифования круги зернистостью – 200/160...100/80 (марок АС4, АС6), для чистового шлифования – зернистостью 80/63...50/40 (марок АС2, АС4), для доводочного шлифования – зернистостью 40/28 и мельче.

В случае, когда предварительное и окончательное шлифование производится одним кругом следует применять круги зернистостью 100/80...63/50 (марок АС4, АС6).

Связка абразивных инструментов служит для сцепления зерен шлифовальных материалов и удержания их от преждевременного выкрашивания в процессе шлифования. Она оказывает большое влияние на работоспособность абразивных кругов. От количества, вида, качества и равномерности распределения связки в абразивном круге зависят твердость, прочность, структура, неуравновешенность круга и допускаемая скорость шлифования.

В процессе резания затупившиеся зерна выкрашиваются или раскалываются, обнажая новые острые кромки, то есть инструмент самозатачивается, автоматически поддерживая свои режущие свойства. При неправильно выбранной связке происходит ненормальный износ абразивных инструментов, характеризуемый либо «засаливанием», когда инструменты теряют свои режущие свойства вследствие засорения пор размельченной связкой и стружкой, либо осыпанием вполне работоспособных зерен. В первом случае на обрабатываемой поверхности наблюдаются прижоги, а во втором случае – повышенный износ кругов.

Для изготовления абразивных кругов применяют неорганические (керамические, силикатные) и органические (бакелитовые, вулканитовые) связки. Из них наиболее распространены керамическая, бакелитовая и вулканитовая связки.

Керамическая связка (K0, K1, K3 и др.) состоит из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца и других материалов. Круги на керамической связке обладают высокой прочностью и кромкостойкостью, допускают применение СОЖ. Однако они хрупки и малоупруги и поэтому тонкие круги на керамической связке не могут воспринимать боковые нагрузки.

Круги на керамической связке изготавливают с использованием электрокорундов и карбида кремния и применяют для всех видов шлифования, за исключением отрезки и прорезания узких пазов.

Бакелитовая связка (Б, Б1, Б2 и др.) представляет собой бакелитовую смолу (пудербакелит) в виде порошка и бакелитового лака. Абразивные круги с такой связкой обладают высокими прочностью и упругостью, что позволяет изготавливать их малой толщины. Недостатком бакелитовой связки является ее низкая теплоемкость, вследствие чего связка при температуре 250...300°C выгорает, а зерна абразива выкрашиваются. Обычно круги на бакелитовой связке применяют при шлифовании всухую, так как при работе с СОЖ прочность и твердость та-

ких кругов резко снижается. Круги на бакелитовой связке с добавлением наполнителя – криолита обладают повышенной стойкостью.

Вулканитовая связка (В, В1, В2 и др.) в основе имеет синтетический каучук, смешанный с небольшим количеством серы. По сравнению с кругами на бакелитовой связке, круги на вулканитовой связке более упруги, но менее теплостойки. Поэтому такая эластичная связка позволяет создавать тонкие, до десятых долей миллиметра, отрезные круги диаметром 150...200 мм.

Алмазные и эльборовые круги изготавливают на бакелитовой, металлической и реже на керамической связках. Из них наиболее часто применяется металлическая связка.

Металлическая связка изготавливается из сплавов на основе меди, олова, железа, алюминия и других металлов. Она отличается высокой прочностью и износостойкостью. Круги на этой связке длительно сохраняют рабочий профиль и применяются в основном при съеме небольших припусков.

Структура абразивного инструмента характеризует строение абразивного инструмента в зависимости от количественного соотношения между зернами, связкой и порами в единице объема и обозначается номерами от 0 до 12. С увеличением номера структуры число зерен уменьшается, а объем связки – увеличивается. Абразивные инструменты структуры 0...3 имеют очень плотное расположение зерен и используются для профильного шлифования.

Абразивные инструменты структуры 5...8 имеют среднее соотношение объемов зерен, связки и пор и применяются для всех видов работ. В частности, структуры 5...6 применяются для наружного и бесцентрового шлифования; структуры 7...8 - для плоского и внутреннего шлифования; структуры 8...9 - для отрезки.

Абразивные инструменты с открытой структурой (9...12) имеют наименьшее объемное содержание зерен и большие размеры пор. Работа такими инструментами улучшает отвод стружки и охлаждение зоны шлифования, а также уменьшает вероятность появления «засаливания» круга. Это позволяет работать на повышенных режимах и предотвращать появление дефектов на обработанной поверхности.

Концентрация зерен в абразивном слое является условной характеристикой режущей способности алмазных и эльборовых кругов. За 100% концентрацию принимают содержание 0,878 г (4,4 карата) зерен алмаза или эльбора в 1 см³ абразивного слоя, что составляет 25% его объема. С увеличением концентрации повышается режущая способность и стойкость кругов. Для окончательного шлифования и доводки

рекомендуются круги 100% и 150% концентрации, а для профильного шлифования – круги 150% и 200% концентрации.

Предварительное шлифование и заточку твердосплавных инструментов выполняют кругами на металлической связке со 100% или 150% концентрацией; резбошлифование твердосплавных инструментов, мелко модульных фрез – кругами со 150% концентрацией алмазов.

Твердость абразивных инструментов – это способность связки удерживать зерно в инструменте при воздействии на него внешних сил. Чем меньше твердость инструмента, тем легче и быстрее из него удаляются затупившиеся зерна, и наоборот.

Установлена следующая шкала степеней твердости абразивных инструментов: М1...М3 – мягкие; СМ1 и СМ2 – среднемягкие; С1 и С2 – средние; СТ1...СТ3 – среднетвердые; Т1 и Т2 – твердые; ВТ1 и ВТ2 – весьма твердые; ЧТ1 и ЧТ2 – чрезвычайно твердые. Здесь цифры 1, 2 и 3 характеризуют твердость абразивного инструмента в порядке ее возрастания.

Твердость абразивных инструментов определяют двумя основными методами: пескоструйным (по глубине лунки на инструменте, образованной под действием определенного объема кварцевого песка, выбрасываемого воздухом, подаваемым под давлением 15 МПа); вдавливанием стального шарика на твердомере Роквелла.

В большинстве случаев шлифования применяют абразивные круги средней степени твердости, обеспечивающие высокую производительность и большую стойкость. При бесцентровом, внутреннем и плоском шлифовании применяют более мягкие круги, чем при круглом наружном шлифовании, а при профильном шлифовании, резбошлифовании, шлифовании прерывистых поверхностей и заготовок малых диаметров используют более твердые круги. Шлифование с использованием СОЖ выполняют более твердыми кругами.

Общее правило выбора твердости абразивных кругов гласит: чем мягче обрабатываемый материал, тем выше должна быть твердость круга и наоборот. Поэтому, например, для устранения опасности появления прижогов и трещин применяют более мягкие круги.

Точность абразивных инструментов. В зависимости от требований к зерновому составу, предельным отклонениям поверхностей, их взаимному расположению, наличию сколов, трещин и раковин шлифовальные круги выпускают трех классов точности: АА, А и Б, а остальные инструменты – двух классов: А и Б.

Круги класса АА имеют наименьшие отклонения от заданных размеров. Допускаемые отклонения для инструментов класса Б в 1,5...2,0

раза превышают отклонения аналогичных параметров кругов класса А, которые в свою очередь больше соответствующих классу АА.

Круги класса точности АА применяют для прецизионной обработки шлифованием высокоточных заготовок из материалов всех групп обрабатываемости, а также для скоростного и высокоскоростного прецизионного шлифования особо точных заготовок.

Круги класса точности А применяют для окончательной обработки шлифованием заготовок из материалов всех групп обрабатываемости, а также для скоростного и высокоскоростного окончательного шлифования.

Для менее ответственных операций абразивной обработки применяют инструменты класса точности Б.

Неуравновешенность шлифовальных кругов возникает при несовпадении их центра масс с центрами вращения. Причинами неуравновешенности могут быть погрешности установки круга на планшайбе и планшайбы с кругом на шпинделе станка, погрешности геометрической формы круга, его неравномерный износ в процессе шлифования и т.д.

Неуравновешенность круга приводит к появлению вибраций и, как следствие, к ухудшению качества обрабатываемой поверхности (появ-

ляется огранка, волнистость, прижоги и т.д.), преждевременному выходу из строя шпиндельного узла станка, а иногда и к разрушению круга.

Контроль неуравновешенности обычно производят на станках для статической балансировки, основной частью которых являются два параллельно расположенных цилиндрических валика одинакового диаметра (рис.13.2). Суть статической балансировки заключается в следующем: круг на балансировочной оправке устанавливают на валики и легким толчком медленно вращают. При этом «тяжелая» часть круга стремится занять крайнее нижнее положение. После остановки круга отмечают верхнюю точку его периферии и к ней крепят зажим с грузом определенной массы. Груз подбирают до тех пор, пока круг не

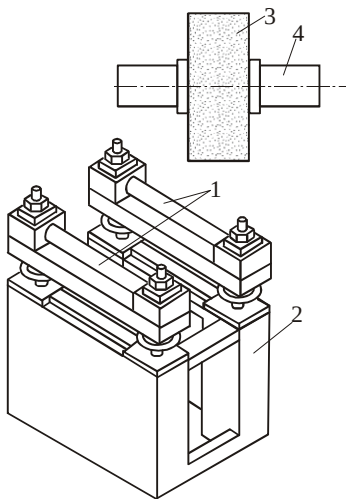


Рис.13.2. Балансировочный станок:
1 – параллельные цилиндрические валики; 2 – станина; 3 – шлифовальный круг; 4 – оправка

будет находиться в безразличном стоянии равновесия. Затем абразивный круг устанавливают на шлифовальный станок.

Балансировку алмазных и эльборовых кругов производят либо путем высверливания или растворения металла «тяжелой» части кругов, либо путем нанесения компенсирующего расплава на «легкую» часть кругов.

В зависимости от допускаемых неуравновешенных масс и по мере их возрастания установлены четыре класса неуравновешенности шлифовальных кругов: 1, 2, 3 и 4.

Круги класса точности АА должны иметь наименьшую неуравновешенность 1 класса. Круги класса точности А могут иметь неуравновешенность 1 и 2 классов, а класса точности Б – 1, 2 и 3 классов неуравновешенности.

Круги класса точности АА легко балансируются и в большинстве случаев могут работать в процессе эксплуатации до полного износа без периодической балансировки.

Круги классов точности А и Б рекомендуется после первой балансировки править не только по периферии (рабочей поверхности), но и по торцам круга. Это позволяет уменьшить или даже полностью исключить появление эксплуатационной неуравновешенности при шлифовании.

Маркировка шлифовальных инструментов наносится на одной из сторон круга водостойкой краской.

Пример маркировки абразивного круга:

ПП 500×50×305 24А 10-П С2 7 К5 35м/с А 1 кл ГОСТ 2424-83

ПП – тип круга; 500×50×305 – наружный диаметр×высота×диаметр посадочного отверстия; 24А – марка шлифовального материала; 10-П – зернистость; С2 – степень твердости; 7 – номер структуры; К5 – марка связки; 35м/с – рабочая окружная скорость; А – класс точности круга; 1 кл – класс неуравновешенности.

Пример маркировки алмазного шлифовального круга:

1 А 1 300×40×76×5 АС4 100/80 100 БП2 2720-0139 ГОСТ 16167-80

1 – форма сечения корпуса; А – форма сечения алмазоносного слоя; 1 – расположение алмазоносного слоя на корпусе круга; 300×40×76×5 – наружный диаметр×высота×диаметр посадочного отверстия×толщина алмазоносного слоя; АС4 – марка алмазного шлифпорошка; 100/80 – зернистость алмазного шлифпорошка; 100 – условная концентрация шлифматериала; БП2 – марка связки; 2720-0139 – обозначение типоразмера круга.

13.2. Профилирование и правка шлифовальных кругов

В процессе шлифования вследствие износа происходит потеря первоначальной геометрической формы и режущих свойств шлифовального круга. Поэтому требуется периодическое профилирование и правка кругов.

Профилирование круга – это формообразующая операция, предназначенная для исправления погрешностей геометрической формы круга и установки правильного положения его режущих поверхностей. Профилирование применяется также для образования на режущей поверхности круга заданного фасонного профиля.

Правка круга – это процесс обновления режущей поверхности круга с целью повышения его режущих свойств и снижения шероховатости шлифуемой поверхности. Правка обеспечивает правильную геометрическую форму круга, удаляет с его поверхности «засаленный» слой абразива, а также затупившиеся зерна и оказывает влияние на качество шлифованной поверхности.

Правка по своему назначению аналогична заточке лезвийных режущих инструментов. В ряде случаев, когда необходимо одновременно восстановить геометрическую форму и режущие свойства абразивного круга, профилирование и правку круга совмещают.

Правка шлифовальных кругов осуществляется следующими методами: обтачиванием, обкатыванием, шлифованием, тангенциальным точением и накатыванием (рис.13.3).

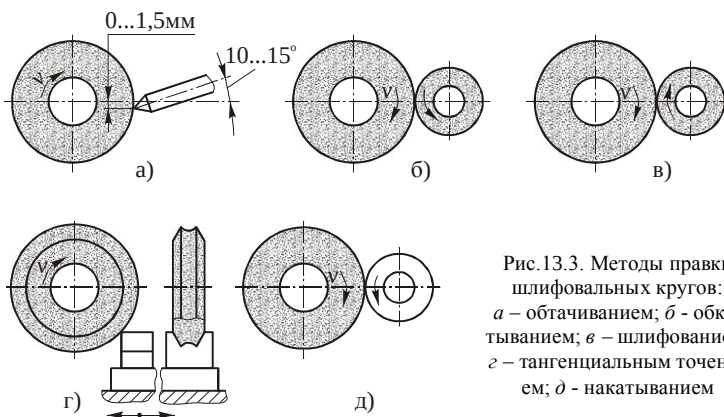


Рис.13.3. Методы правки шлифовальных кругов:
 а – обтачиванием; б – обкатыванием; в – шлифованием;
 г – тангенциальным точением; д – накатыванием

Правка обтачиванием – метод, при котором правящий инструмент выполняет роль резца, а скорость обтачивания равна скорости вращения шлифовального круга.

Метод обтачивания применяется для правки абразивных кругов, кругов из эльбора на бакелитовой и керамической связке и алмазных кругов на керамической связке. При правке этим методом достигаются высокие режущая способность круга и точность профиля его рабочей поверхности.

В качестве правящего инструмента используют алмазные зерна в оправках, алмазные иглы и алмазные карандаши.

Алмазные зерна больших размеров (массой 0,2...1,0 карат) закрепляют в металлической оправке зачеканкой на свинцовой подушке, пайкой цинковым припоем или механически (рис.13.4, а).

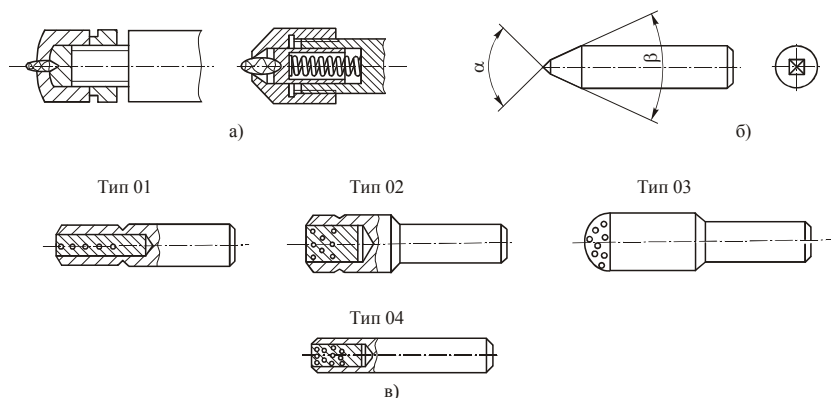


Рис.13.4. Инструменты для правки шлифовальных кругов методом обтачивания:
а – алмазные зерна; б – алмазная игла; в – алмазные карандаши

Алмазные иглы представляют собой стальной стержень с запаянным в нем алмазом массой 0,1...0,25 карат, имеющим острую вершину (рис.13.4, б). Алмазные иглы широко применяют для правки однониточных резбошлифовальных кругов.

Алмазные карандаши представляют собой стальной цилиндр с алмазной вставкой, в которой в определенном порядке размещены кристаллы алмазов, скрепленные специальным составом. В зависимости от расположения алмазных зерен (рис.13.4, в) карандаши бывают четырех типов: 01 – расположение зерен цепочкой; 02 – слоями; 03 – на сферической поверхности; 04 – не ориентированные зерна. В алмазных каран-

дашах применяют алмазы массой 0,5...0,01 карат. Причем наиболее крупные алмазы используются в карандашах типа 01, а наиболее мелкие – в карандашах типа 04.

При правке обтачиванием инструмент устанавливают с наклоном относительно шлифовального круга (14.3,а). Это позволяет поддерживать высокую режущую способность инструмента путем его периодического поворота вокруг своей оси. При этом рабочую кромку алмаза устанавливают на уровне линии центра абразивного круга или ниже ее на 1,5 мм.

Правка обкатыванием – метод, при котором дробление и удаление скалыванием затупившихся абразивных зерен на рабочей поверхности круга осуществляется правящим инструментом, прижимаемым к кругу и получающим вращение от него за счет сил трения. Этот метод применяется для профилирования шлифовальных кругов из электрокорунда и карбида кремния, имеющих прямолинейную образующую.

При правке обкатыванием в качестве правящего инструмента используют абразивные, стальные и твердосплавные диски, а также стальные звездочки (рис.13.5).

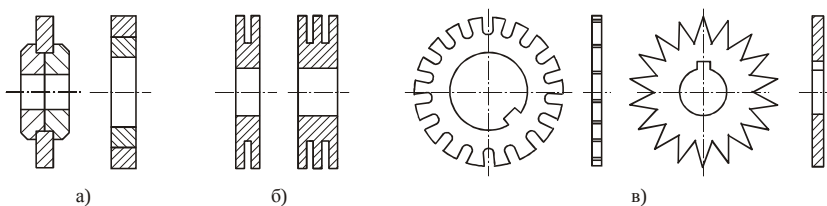


Рис.13.5. Инструменты для правки шлифовальных кругов методом обкатывания: а – твердосплавные ролики; б – стальные диски; в – тупозубая и острозубая звездочки

Абразивные диски – это круги из карбида кремния черного или электрокорунда белого, диаметр которых в 2...5 раз меньше диаметра шлифовального круга. Твердость абразивного диска на 2...4 степени больше твердости шлифовального круга, а зернистость – на 2...4 номера меньше.

Диски из твердого сплава марок ВК3, ВК6 изготавливают либо монолитными, либо в виде стальной ступицы с рабочим ободом из твердого сплава (рис.13.5, а).

Стальные диски диаметром 50...70 мм изготавливают из стали ШХ15 или из сталей 10, 20,30, цементированных и закаленных до твердости HRC₃ 56...62 (рис.13.5, б).

Звездочки – это набор тупозубых или острозубых дисков, изготовленных из углеродистой стали, закаленной до твердости HRC_{Σ} 60...62 (рис.13.5,в).

При правке обкатыванием правящий инструмент имеет вид абразивных, стальных или твердосплавных дисков и звездочек, установленных на оправке поодиночке или пакетом и свободно вращающихся на ней. При этом ось правящего инструмента устанавливается под углом $8...10^{\circ}$ относительно оси шлифовального круга. Такой наклон создает условия для проскальзывания инструмента, при котором интенсифицируется процесс правки и осуществляется заглаживание поверхности круга. С увеличением наклона оси правящего инструмента его износ увеличивается.

Правка шлифованием осуществляется медленно вращающимся правящим инструментом, который получает принудительное вращение от отдельного привода. При этом скалывание абразивных зерен происходит за счет разности скоростей шлифовального круга и правящего инструмента. Этот метод применяется при правке алмазных и эльборовых кругов на металлической связке кругами из карбида кремния зеленого или с введением электрического тока в зону контакта.

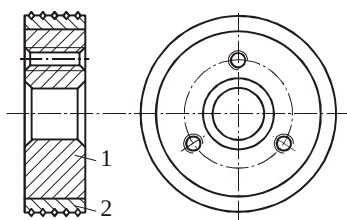


Рис.13.6. Алмазный ролик для правки шлифовальных кругов методом шлифования: 1 – корпус; 2 – алмазоносный слой

При правке шлифованием в качестве правящего инструмента используют абразивные круги и алмазные ролики.

Абразивные круги изготавливают из карбида кремния зеленого на керамической связке формы ПП, зернистостью 125...50, твердостью СТ2...ВТ диаметром 60...250 мм.

Алмазные ролики (рис.13.6) выпускают диаметром 70 мм и высотой 20 мм. Они состоят из алмазоносного слоя 2 и корпуса 1 из стали 45.

Правка тангенциальным точением аналогична методу обтачивания, но осуществляется брусками прямого или фасонного профиля. При этом брусок, имеющий профиль, соответствующий профилю детали, закрепляют на столе плоскошлифовального станка. Шлифовальный круг при каждой подаче на глубину постоянно обновляет свой профиль и, тем самым, обеспечивает высокое качество и точность размеров обрабатываемой поверхности.

Эльборовые круги на органической и керамической связках правят

алмазными брусками и брусками из карбида кремния зеленого, а алмазные круги – брусками из карбида кремния зеленого и электрокорунда белого.

Правка накатыванием осуществляется в результате взаимного вращения накатного ролика и шлифовального круга. Она представляет собой комбинацию пластического деформирования, сопровождаемого дроблением зерен и связки, а также уплотнения поверхности круга. При этом правящий ролик имеет профиль, соответствующий профилю детали, и изготавливается из закаленной стали или твердого сплава с алмазным покрытием и без него (рис.13.7).

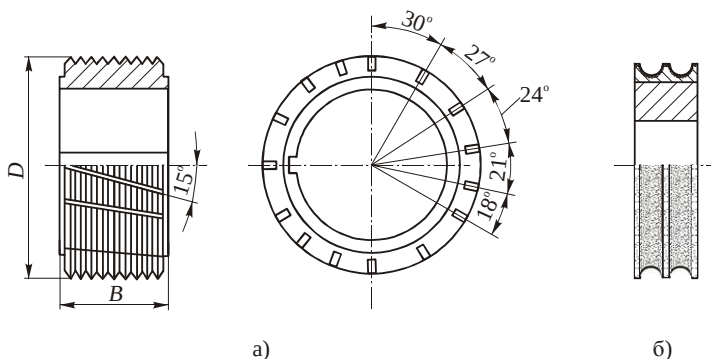


Рис.13.7. Ролики для правки шлифовальных кругов методом накатывания:
а – стальной; б – алмазный

Для ускорения процесса правки, повышения качества поверхности круга и обеспечения надежного отвода шлама на роликах делают продольные канавки с неравномерным окружным шагом. Правка накатыванием применяется при многониточном резбошлифовании и шлифовании мелко модульных зуборезных инструментов (долбляков, шеверов и эвольвентных протяжек). Так, например, профилирование и правка многониточных резбошлифовальных кругов производится накатными роликами, изготавливаемыми из стали Р6М5 и закаленными до твердости HRC_2 63...65 (рис.13.7,а). Профиль резьбы ролика должен соответствовать профилю накатываемой резьбы. Диаметр ролика выбирают в зависимости от диаметра $D_{кр}$ шлифовального круга: $D = (0,2...0,25) D_{кр}$, а ширину B берут равной длине профиля круга. На наружной поверхности ролика имеются винтовые канавки с неравномерным окружным шагом, расположенные под углом наклона $\omega = 15^\circ$.

13.3. Некоторые специальные конструкции абразивных инструментов

В современном машиностроении применяется большое многообразие конструкций абразивных инструментов. Для большинства из них характерны простота формы, способа установки и крепления и поэтому здесь они подробно не рассматриваются. Однако некоторые из абразивных инструментов требуют более детального рассмотрения.

Абразивные инструменты для шлифования сложнофасонных поверхностей.

Круги для шлифования цилиндрических червяков имеют коническую или тороидальную формы [17].

Дисковые шлифовальные круги заправляют на конус с одной или двух сторон. Ось шлифовального круга устанавливают к оси червяка под углом, равным действительному углу подъема линии витка червяка γ_{m0} (рис.13.8,а).

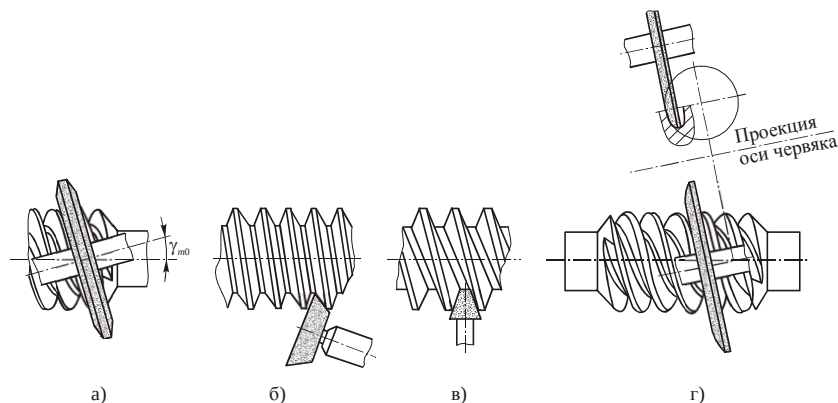


Рис.13.8. Абразивные круги для шлифования цилиндрических червяков:
 а – дисковый; б – чашечный; в – пальцевый конусный; г – тороидальный

Чашечные конусные круги имеют прямолинейную образующую конуса и работают торцем круга (рис.13.8,б).

Пальцевые конусные круги также имеют прямолинейный профиль. Ось пальцевого круга располагают под прямым углом к оси червяка (рис.13.8,в).

Тороидальные круги устанавливают относительно обрабатываемого отверстия таким образом, что ось круга располагается относительно оси червяка под углом, при котором одно из плоских сечений главной поверхности червяка является дугой окружности, совпадающей с образующей производящего тора (рис.13.8,г).

Круги для резьбошлифования бывают односторонние и многосторонние.

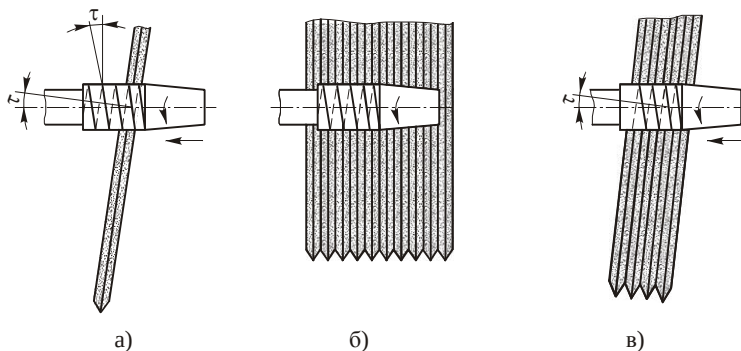


Рис.13.9. Схемы шлифования резьбы:

а – односторонним кругом; *б* – многосторонним кругом способом врезания;
в – многосторонним кругом способом осевой подачи

Односторонние круги (рис.13.9,а) используют для шлифования боковых сторон профиля витка и дна впадины резьбы. Такой круг устанавливают под углом подъема резьбы τ . При этом точность шлифования резьбы по шагу на длине 100 мм составляет 0,004 мм; по среднему диаметру - $\pm 0,0025$ мм ($d_2 = 10 \dots 40$ мм); по половине угла профиля - $\pm 3'$.

Многосторонние круги (рис.13.9,б,в) имеют кольцевые канавки ($\tau = 0$) и кроме боковых сторон витков резьбы и дна впадин шлифуют также и вершины. Когда оси круга и заготовки параллельны, то это приводит к пересечению направления ниток резьбы на круге и изделии и, соответственно, к разбивке профиля резьбы (рис.13.9,б). Поэтому многосторонними кругами, работающими по схеме врезания, точные резьбы с большим углом подъема τ не шлифуют.

При многостороннем врезном шлифовании коротких резьб вначале врезаются с поперечной подачей на полную глубину профиля, а затем задают осевую подачу на один шаг. Таким образом, резьба шлифуется

за $1\frac{1}{2} \dots 1\frac{1}{3}$ оборота заготовки. При этом ширина многониточного круга должна быть на 2...3 шага больше длины нарезаемой резьбы.

Шлифование многониточными кругами длинных резьб выполняют с осевой подачей (рис.13.9,в). При этом ось круга устанавливают под углом подъема резьбы τ , предварительно заправив заборную часть заготовки в виде конуса. Первые витки круга прорезают резьбу начерно, следующие витки производят получистовое, а последние – чистовое шлифование.

Точность шлифования многониточными кругами меньше, чем односторонними: отклонения по шагу ($P < 1,0$ мм) на длине 25 мм – 0,008 мм, на длине 100 мм – 0,012 мм; отклонение по среднему диаметру резьбы – $\pm 0,01$ мм; по половине угла профиля – $16'$.

Шлифование многониточными кругами более производительное, чем односторонними, но менее точно. Поэтому для высокопроизводительного шлифования длинных точных резьб целесообразно многониточными кругами вести предварительное, а односторонними – окончательное шлифование резьб.

Абразивные инструменты для зубошлифования работают по методам копирования и обкаточного огибания (обката).

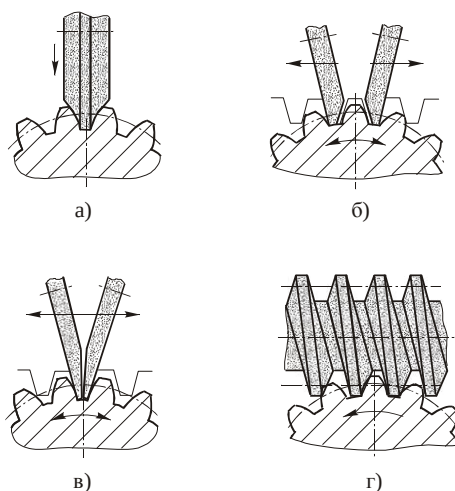


Рис.13.10. Методы зубошлифования: а – копирования; б, в – обката двумя тарельчатыми кругами; г – обката абразивным червяком

Шлифование зубьев прямозубых цилиндрических колес по методу копирования осуществляется фасонным шлифовальным кругом с профилем, соответствующим профилю впадины между зубьями обрабатываемого колеса (рис.13.10,а) с последующим делением на каждый зуб колеса.

При шлифовании методом обката режущая поверхность круга соответствует профилю нормальной зубчатой рейки, обкатываемой по начальной окружности обрабатываемого колеса. Этим методом пользуются при обкатке одновременно двумя кругами с делением через зуб (рис.13.10,б) и на каждый зуб (рис.13.10,в), а при непрерывной обкатке – абразивным червяком (рис.13.10,г).

Шлифование методом обката осуществляется прямолинейными боковыми сторонами тарельчатых кругов класса точности АА, образующими при обработке профиль прямозубой рейки. Такие круги шлифуют зубья колес узкой полоской шириной 2...3 мм. Поэтому давление и нагрев в зоне резания незначительны, а точность обработки высока. Для предотвращения погрешностей, вызванных износом абразивных кругов, зубошлифовальные станки снабжают приспособлениями для автоматической правки кругов.

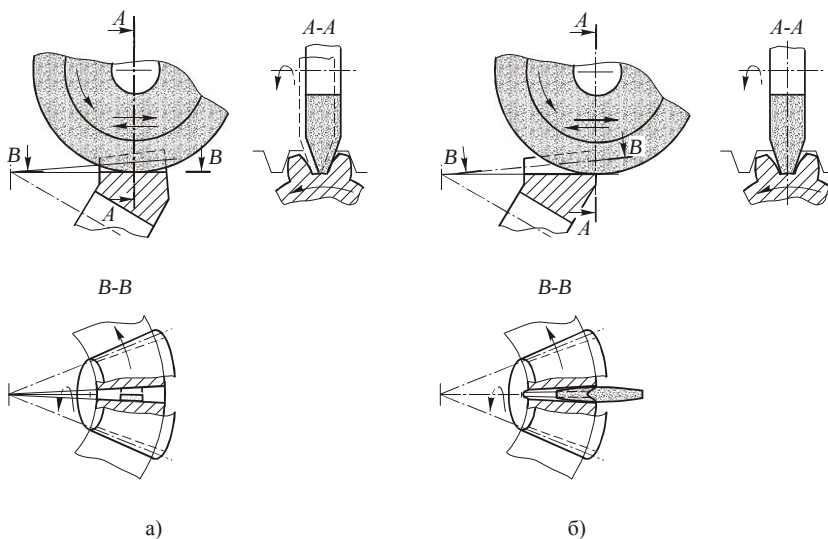


Рис.13.11. Схемы шлифования прямозубых конических колес дисковым кругом, работающим двумя коническими поверхностями: а – раздельно по каждой стороне впадины между зубьями; б – одновременно по двум сторонам впадины между зубьями

Шлифование зубьев колес методом обката абразивным кругом, имеющим червячный профиль, является наиболее прогрессивным. Эти инструменты обеспечивают обработку зубьев термически обработанных цилиндрических колес модулем $m \leq 7$ мм и диаметром до 700 мм 5...7 степеней точности и производительностью в 4...5 раз превышающей другие способы зубошлифования. Зубья колес модулем $m \leq 1$ мм вышлифовывают из целой заготовки без предварительного нарезания. При этом червячный профиль круга образуется непосредственно на зубошлифовальном станке накатным роликом или профильным алмазным резцом.

Шлифование прямозубых конических колес производят по методу обката двумя кругами раздельно на каждой стороне впадины зуба (рис.13.11,а) или одновременно по двум сторонам впадины зуба (рис.13.11,б).

Шлифование колес с криволинейными зубьями осуществляют кругами: а) чашечно-цилиндрическим; б) чашечно-коническим.

Шлифование чашечно-цилиндрическим кругом по методу обката (рис.13.12,а) заключается в том, что чашечный круг 2, расположенный на люльке станка 1, вращается вокруг своей оси со скоростью резания v и одновременно относительно оси люльки со скоростью обката $v_{обк}$. При этом конические поверхности круга, расположенные под углом исходного контура, воспроизводят боковые поверхности зуба плоско-вершинного производящего колеса. Это колесо, имея один материальный зуб в виде активных поверхностей чашечного круга, зацепляясь с заготовкой 3, вышлифовывает в ней профиль впадины. При повторении этого процесса z раз (z – число зубьев нарезаемого колеса) колесо будет вышлифовано полностью. На время перехода шлифования от впадины к впадине круг отводится от заготовки.

При шлифовании чашечно-коническим кругом по методу обката (рис.13.12,б) круг 2 имеет в одном осевом сечении профиль, совпадающий с профилем цилиндрического чашечного круга 2'. В сечении $A-A$ плоскостью, проходящей через начальную поверхность, виден рабочий контур абразивного инструмента, очерченный двумя эллипсами. Такой контур имеет меньшую площадь контакта с обрабатываемой поверхностью и наименьшее тепловыделение. Поэтому шлифование чашечно-коническим кругом более производительное, чем чашечно-цилиндрическим кругом и менее опасно с точки зрения появления прижогов.

Для зубошлифования и особенно твердых легированных сталей применяют мягкие шлифовальные круги, так как они не вызывают по-

явления трещин и прижогов. При этом зернистость кругов выбирают в зависимости от модуля шлифуемых колес: чем меньше модуль, тем меньше зернистость.

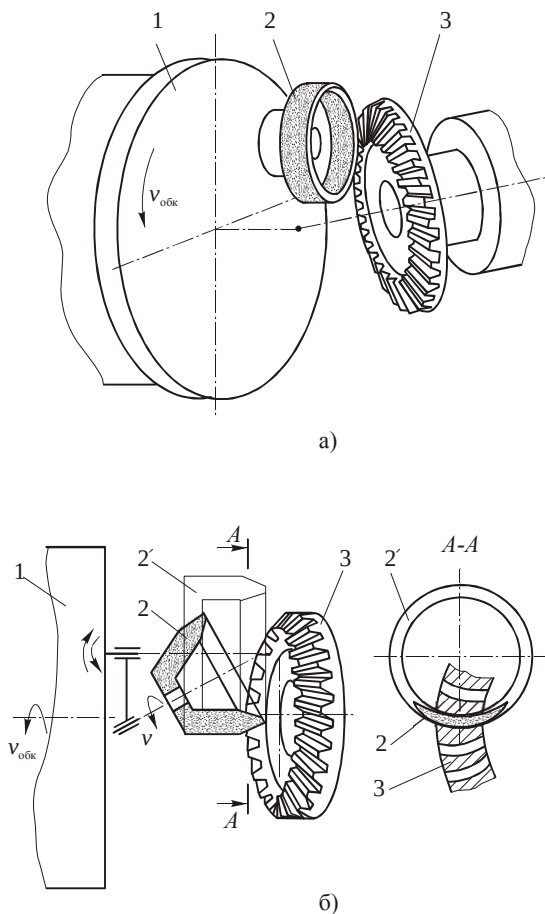


Рис. 13.12. Методы шлифования конических колес с криволинейными зубьями:
 а – обката чашечно-цилиндрическим кругом; б – обката и врезания чашечно-коническим кругом

Абразивные инструменты для иллицешлифования являются частным случаем зубошлифовальных инструментов и применяются для

шлифования шлицевых валов с точностью $IT6...8$. Наружные поверхности таких валов шлифуют на круглошлифовальных станках, а боковые стороны и внутренняя поверхность шлицев – на шлицшлифовальных станках. В последнем случае шлифование производят следующими способами: а) одновременным шлифованием одним кругом дна и боковых сторон шлицев по методу копирования (рис.13.13,а); б) одновременным шлифованием тремя кругами дна и боковых сторон шлицев (рис.13.13,б); в) раздельным шлифованием кругами различных профилей дна и боковых сторон шлицев (рис.13.13,в).

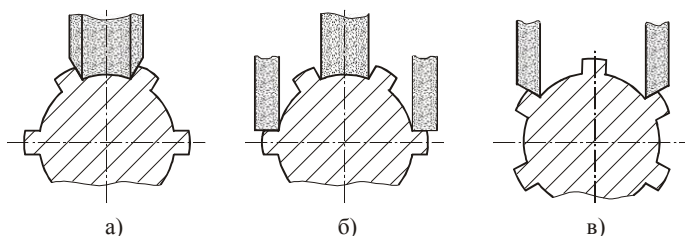


Рис.13.13. Схемы шлифования шлицев: а – методом копирования; б – одновременным шлифованием; в – раздельным шлифованием

Для шлифования боковых поверхностей шлицев применяют круги из электрокорунда белого на бакелитовой связке зернистостью 40...25, степени твердости СТЗ...Т1, а для одновременного шлифования дна и боковых сторон шлицев – круги из электрокорунда белого на керамической связке зернистостью 32...16, степени твердости СМ2...СТ1.

При шлицшлифовании закаленных сталей применяют эльборовые круги зернистостью Л16 и твердостью СМ2...СТ1 на керамической связке.

Прогрессивные конструкции абразивных инструментов

Прерывистые шлифовальные круги (рис.13.14) изготавливают путем прорезания, накатывания или прессования пазов на рабочих поверхностях обычных абразивных кругов. Для изготовления таких кругов рекомендуется использовать круги с повышенной на 1...2 степени твердостью и меньшей зернистостью по сравнению с обычными кругами.

Наличие впадин на рабочей поверхности круга обеспечивает лучшие условия охлаждения шлифуемой поверхности за счет подвода СОЖ непосредственно в зону контакта круга с заготовкой. В зависимости от протяженности впадин (2...45 мм) силы и температура шлифования

снижаются на 10...40%. Благодаря этому при работе на повышенных режимах резания и при обработке высокопрочных материалов уменьшается вероятность появления поверхностных дефектов – прижогов и микротрещин.

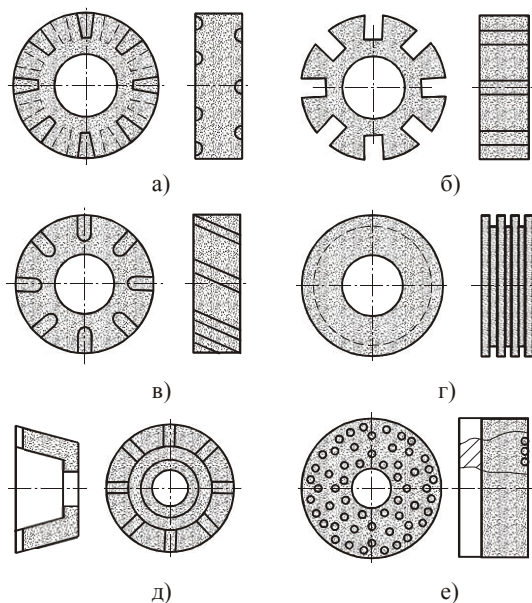


Рис. 13.14. Прерывистые абразивные круги: а – с выточками; б – с пазами; в – с прорезями; г – с канавками; д – с насечками; е – с отверстиями

Абразивные высокопористые круги благодаря порам обладают лучшим проникновением СОЖ в зону обработки, хорошей самозатачиваемостью и меньшей «засаливаемостью». Применение таких кругов уменьшает число зерен на рабочей поверхности круга и силу резания, приходящуюся на одно зерно, облегчает правку и повышает эффективность использования СОЖ. Однако прочность пористых кругов несколько меньше прочности обычных кругов.

Схема устройства для подачи СОЖ через поры круга показана на рис. 13.15. Здесь СОЖ через осевое отверстие в шпинделе станка 3, радиальные отверстия 2 подводится к шлифовальному кругу 1, а затем под действием центробежных сил проходит через поры круга на его рабочую поверхность (периферию круга). При этом СОЖ одновременно с

охлаждением зоны обработки обеспечивает очистку рабочей поверхности круга от затупившихся зерен.

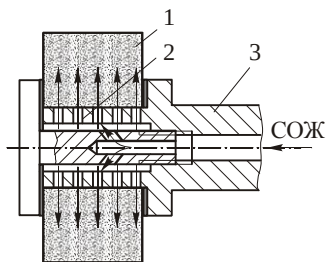


Рис. 13.15. Подача СОЖ через поры шлифовального круга:

1 - шлифовальный круг; 2 – радиальные отверстия; 3 – шпиндель станка

Пористые круги изготавливают на керамической связке. Причем высокопористое строение круга создается либо за счет газообразования при химической реакции, протекающей в круге во время его изготовления, либо за счет введения выгорающих добавок в состав круга.

Чаще всего в качестве порообразователей используют порошки синтетических смол, искусственных и природных материалов, (нафталин, полистирол, кокс, торф, опилки, перлит и др.). Введение таких выгорающих добавок приводит к образованию в процессе термообработки инструмента большой объемной пористости (до 70%) и к увеличению размеров отдельных пор. Так, например, при использовании в качестве порообразующего наполнителя синтетического полистирола марки ПСС и перлита* марки П объемное содержание пор для кругов зернистостью 40...16 может находиться в пределах от 5 до 25%, а зернистостью 12...6 – от 10 до 30%.

Применение высокопористых кругов приводит к снижению в 1,5...1,7 раза температуры обрабатываемой поверхности, что позволяет осуществлять бесприжоговое шлифование труднообрабатываемых материалов. При этом уменьшаются энергетические затраты, а производительность процесса шлифования возрастает на 15...70%.

Импрегированные шлифовальные круги – это абразивные круги, пропитанные специальными составами – импрегнаторами (графит, дисульфид молибдена, стеарин, парафин, формальдегидные смолы и др.). Заполнение пор абразивных кругов наиболее часто осуществляют путем свободного капиллярного заполнения их жидкими составами.

Пропитку абразивных инструментов применяют как средство регулирования их прочностных свойств и твердости и как способ применения смазки. В первом случае, например, для повышения твердости абразивных инструментов на керамической связке применяется пропитка

* Перлит – горная порода, которая при нагревании вспучивается с многократным увеличением объема и образует легкий пористый материал

инструмента в бакелитовом растворе, а для снижения твердости этих же инструментов их кипятят в водном растворе каустической соды. Во втором случае пропитку применяют для изменения процессов контактного взаимодействия инструмента с заготовкой. В связи с этим на поверхностях абразивных зерен и связки формируется смазочное покрытие, а в порах инструмента создаются микрообъемы смазки, которая находится в твердом или пластическом состоянии. После размягчения смазки теплотой резания, она перемещается в зону обработки под действием центробежных сил.

Эффективность импрегнирования значительно выше при сухом шлифовании, чем при работе с СОЖ и при обработке закаленных сталей, чем незакаленных. В целом, импрегнирование позволяет существенно повысить стойкость шлифовальных кругов (в 2...4 раза), снизить их «засаливаемость» и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. В ряде случаев устраняются скрытые тепловые дефекты шлифованной поверхности.

Круги для высокоскоростного шлифования работают на скоростях 80...120 м/с вместо скоростей 25...35 м/с, имеющих место при обычном шлифовании. Это позволяет увеличить стойкость кругов, повысить производительность обработки, а также точность и качество обработанной поверхности.

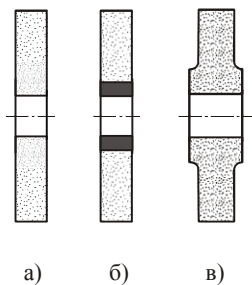


Рис.13.16. Высокоскоростные шлифовальные круги:

- а* – с мелкозернистой смесью;
- б* – с запрессованной втулкой;
- в* – с утолщением в центральной части круга

При высоких скоростях вращения в шлифовальных кругах возникают большие напряжения, вызываемые центробежной силой. Для повышения прочности таких кругов в одних случаях применяют специальные керамические связки К5 и К6 – для работы со скоростью 60 м/с и К43 и К43Л – для работы со скоростью 80 м/с. В других случаях центральную часть кругов, у отверстия, где возникают максимальные напряжения, упрочняют за счет применения мелкозернистых смесей (рис.13.16,а), образующих композицию со связкой, а также за счет запрессовывания втулок из особо прочных материалов: стеклопластиков, металлических колец и т.д. (рис.13.16,б).

Применяют также круги переменного сечения с утолщением центральной части плавно снижающейся к рабочей части (рис.13.16,в). Иногда центральную часть кругов на керамической

связке пропитывают термопластичными составами, например, эпоксидной смолой и др..

Точность кругов для высокоскоростной обработки должна быть классов АА и А, а неуравновешенность не ниже 2 класса для кругов с рабочей скоростью до 60 м/с и не ниже 1 класса – для кругов, работающих со скоростью 80 м/с.

Круги для глубинного шлифования чаще всего используют для вышлифовывания за 1...4 рабочих хода стружечных канавок сверл, концевых и шпоночных фрез, разверток, метчиков и других концевых инструментов в закаленных стальных или спеченных твердосплавных заготовках.

Основными достоинствами глубинного шлифования являются высокие производительность (в 1,5...2,0 раза выше, чем при фрезеровании) и точность обработки при низких трудоемкости и стоимости. Этот процесс требует больших энергетических затрат и характеризуется интенсивным тепловыделением. Поэтому вышлифовывание стружечных канавок по-целому применяют в основном при изготовлении концевых инструментов диаметром до 15 мм. В инструментах больших размеров канавки предварительно получают методами пластического деформирования (прокатыванием или прессованием), а лишь затем шлифуют.

Для вышлифовывания и шлифования канавок инструментов из быстрорежущей стали абразивными кругами обычно применяют круги из электрокорунда 24А на вулканитовой и бакелитовой связках зернистостью 10...16, твердостью СТ2...СТ1 или эльборовые круги на металлической связке (концентрация зерен эльбора 200%). Канавки твердосплавных инструментов вышлифовывают алмазными кругами на металлической связке. При использовании алмазных кругов на органической связке чаще применяют многопроходное шлифование.

Профиль шлифовального круга для вышлифовывания канавок концевых инструментов очерчивается в основном дугами окружностей и прямыми. Так, например, для вышлифовывания канавок сверл наибольшее применение получили радиусно-угловой и двухрадиусный профиль (рис.13.17,а...в). Причем у радиусно-углового профиля круга коническая сторона расположена под углом $\beta_y = 15...35^\circ$. Для повышения стойкости угловой кромки шлифовального круга диаметром D ее скругляют радиусом $r \approx (0,1...0,15)D$ (рис.13.17,в). Для увеличения ширины круга при вышлифовывании канавок мелкоразмерных сверл ($D=0,2...1,5$ мм) используют трехрадиусный профиль (рис.13.17,г).

Упрощенный двухугловой профиль (рис.13.17,д) применяют при вышлифовывании канавок в условиях мелкосерийного производства, а также при вышлифовке резьбы на метчиках.

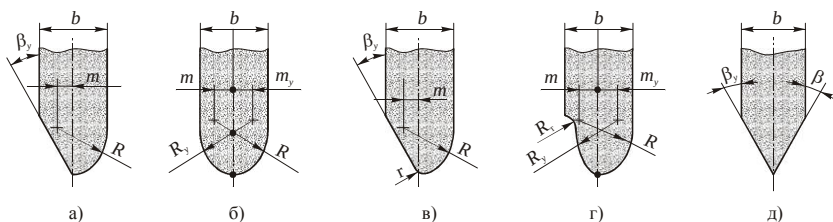


Рис.13.17. Профили шлифовальных кругов для вышлифовки канавок спиральных сверл: а – радиусно-угловой; б – двухрадиусной; в – радиусно-угловой со скругленной кромкой; г – трехрадиусной; д – двухугловой

Абразивные ленты применяют для ленточного шлифования и полирования сложнофасонных заготовок практически из всех материалов. Суть ленточного шлифования состоит в том, что лентопротяжный механизм ленточно-шлифовального станка, состоящий из двух шкивов, охваченных с некоторым натяжением бесконечной абразивной лентой, передает на последнюю крутящий момент. Этим обеспечивается главное движение резания. В месте контакта с заготовкой 1 лента поджимается опорой 2, профилирующей ленту по форме обрабатываемой поверхности (рис.13.18).

Особенность обработки бесконечными лентами состоит в создании предварительного статического нагружения на абразивные зерна за счет прижима ленты к обрабатываемой поверхности и деформирования основания ленты. Это позволяет улучшить условия работы абразивных зерен, повысить их износостойкость, устранить прижоги и микротрещины, улучшить самозатачиваемость режущих зерен и уменьшить интенсивность «засаливания» ленты. Упругие опоры позволяют вести обработку маложестких заготовок, что невозможно осуществлять на обычных шлифовальных станках.

Для ленточного шлифования применяют шлифовальные ленты на тканевой и бумажной основах зернистостью М80...М40 из электрокорунда, карбида кремния и эльбора ЛМ10...ЛМ20. Ширина и длина ленты зависят от размеров обрабатываемой заготовки и конструкции станка. Бесконечность ленты достигается за счет склеивания ее концов. Работоспособность ленты зависит от ее размеров, эластичности и жесткости контактной опоры, свойств обрабатываемого материала, размеров

заготовки и режима обработки: давления на ленту, скорости ленты и глубины шлифования. Оптимальные скорость ленты и давление заготовок на ленту для разных случаев обработки различны. Так, например, при обработке плоских заготовок из чугуна, бронзы и твердых сталей скорость ленты должна быть равна 15...20 м/с, а при цилиндрическом и профильном шлифовании сталей – 25...30 м/с. Давление на ленту при обработке цветных металлов и их сплавов должно быть не более 0,03...0,04 МПа, а сталей и чугунов – 0,05...0,02 МПа.

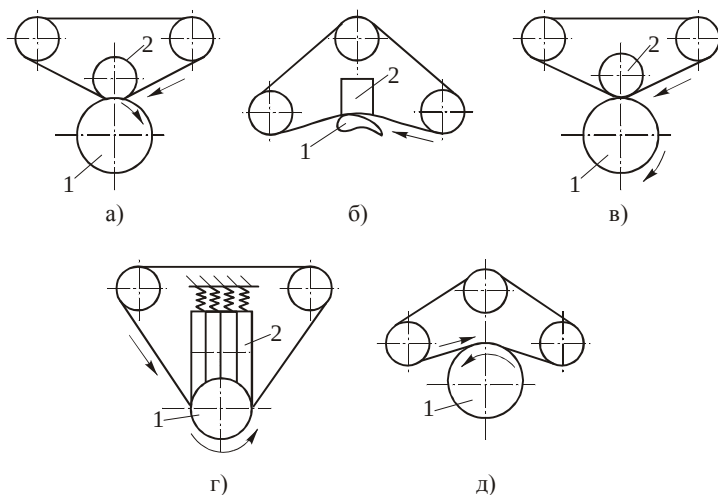


Рис.13.18. Схемы обработки заготовок абразивными лентами:

а – с эластичным контактным роликом; *б* – с жестким копиром;

в – с жестким контактным роликом; *г* – с гибким копиром; *д* – свободной ветвью ленты

Ленточное шлифование и полирование экономически более эффективно, чем обработка войлочными и тканевыми полировально-шлифовальными кругами.

Абразивные инструменты, закрепленные в корпусах сложных конструкций.

Шлифовальные круги со вставными сегментами (рис.13.19) применяются в связи с тем, что сплошные круги больших диаметров мало экономичны, так как материал круга плохо используется из-за: а) больших отходов, остающихся после окончательного износа круга; б) наличия в круге трещин; в) большой площади контакта круга с заготовкой, вызывающей сильный нагрев обрабатываемой поверхности;

г) затрудненных условий подвода СОЖ в зону резания и отвода отходов шлифования.

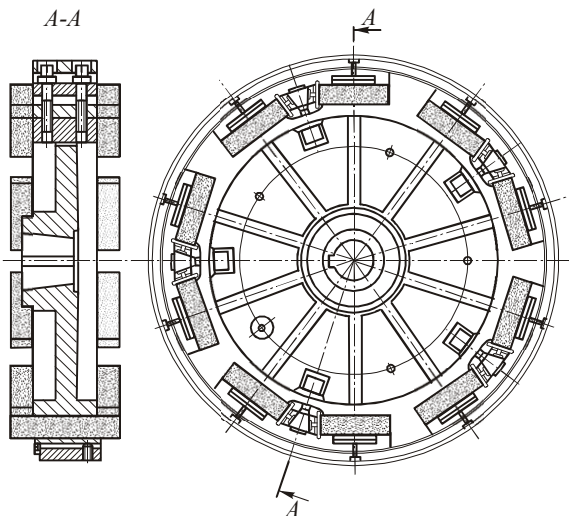


Рис.13.19. Шлифовальный круг со вставными сегментами

Сборные круги применяют для плоского шлифования на вертикальных станках с круглым вращающимся столом. В этом случае шлифовальный круг состоит из нескольких сегментов, закрепленных механическим путем или клеем на стальном корпусе. При этом повреждение одного из сегментов не требует изъятия из эксплуатации всего круга, так как поврежденный сегмент легко заменяется новым. Пространство между сегментами облегчает подвод СОЖ в зону резания и отвод шлама. Меньшая площадь контакта круга с заготовкой способствует уменьшению нагрева обрабатываемой поверхности, а, следовательно, и повышению ее качества. Последнее обстоятельство исключает прижоги при работе на повышенных режимах.

Хонинговальные головки (рис.13.20) применяют для окончательной обработки отверстий диаметром 1...1500 мм и глубиной до 25000 мм. При этом точность обработанных отверстий достигает $IT5...6$, а шероховатость – $Ra\ 0,32...0,08$ мкм. Такие высокие результаты объясняются тем, что в отличие от шлифования процесс хонингования характеризуется: большой площадью контакта брусков с обрабатываемой поверхностью; малой величиной давления брусков и низкой скоростью резания;

значительным количеством одновременно работающих зерен; низкой температурой в зоне резания.

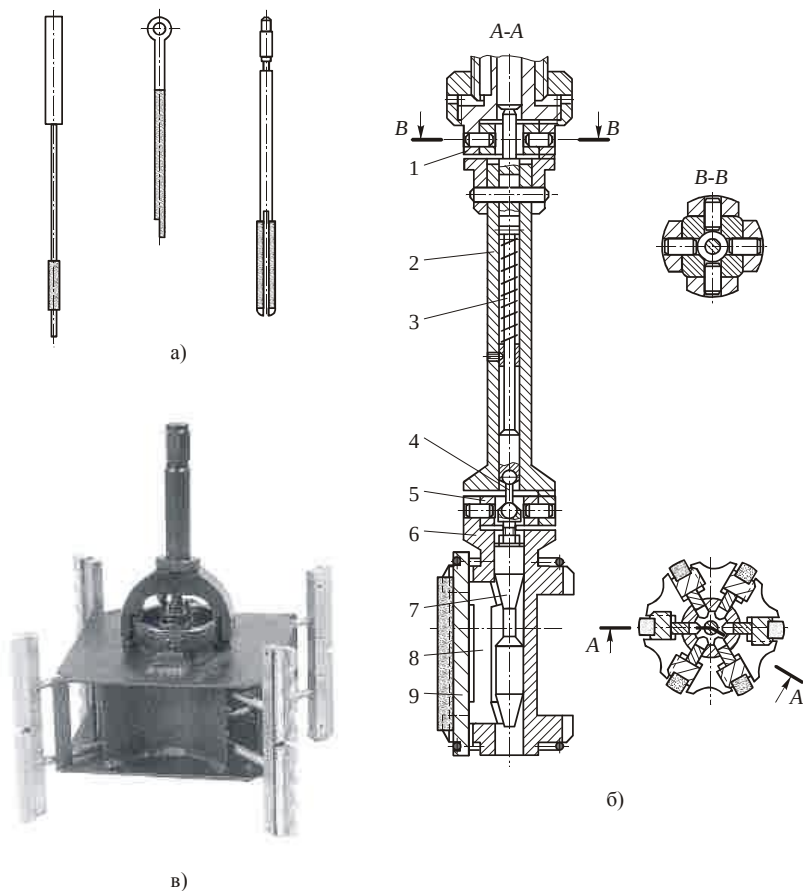


Рис. 13.20. Хонинговальные головки: а – малого диаметра; б – среднего диаметра; в – большого диаметра (фирмы «Sunnen», США)

В зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия хонинговальные головки бывают (рис.13.20): а) малых диаметров (1...5 мм); б) средних диаметров (10...250 мм); в) больших диаметров (250...1500 мм).

При хонинговании головка вращается с окружной скоростью $v_{окр}$ и совершает возвратно-поступательное перемещение вдоль оси обрабатываемого отверстия со скоростью $v_{вп}$. При этом осуществляется непрерывный разжим брусков – радиальная подача.

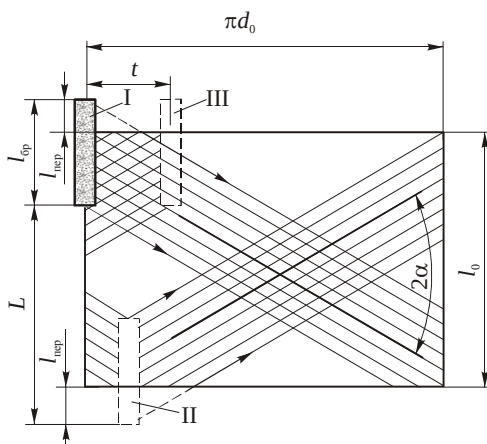


Рис.13.21. Развертка сетки следов на хонингуемой поверхности

В результате совмещения вращательного и возвратно-поступательного движений режущие зерна хонинговальных брусков описывают траектории, развертка которых показана на рис.13.21. Здесь цифрами I, II, III обозначены последовательные положения бруска за один двойной ход головки. Для повышения качества обработанной поверхности число оборотов хонинговальной головки не должно быть кратно числу ее двойных ходов. При этом режущие зерна брусков при возвратно-поступательном движении не повторяют путь предыдущего хода, а смещаются на некоторую величину t , что улучшает качество обработанной поверхности. Изменение направления движения брусков в процессе каждого двойного хода улучшает процесс самозатачивания и восстановления режущей способности брусков. Перемещение хонинговальной головки за каждый ход

$$l_{ход} = l_0 + 2l_{пер} - l_{бр},$$

где l_0 - длина отверстия; $l_{пер}$ - перебег; $l_{бр}$ - длина хонинговального бруска.

Для обеспечения высокого качества обработанной поверхности необходимо, чтобы получаемые в процессе обработки штрихи пересекались под углом $2\alpha = 40 \dots 60^\circ$, величина которого определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = v_{окр} / v_{вп}.$$

В результате совмещения вращательного и возвратно-поступательного движений режущие зерна хонинговальных брусков описывают траектории, развертка которых показана на рис.13.21. Здесь цифрами I, II, III обозначены последовательные положения бруска за один двойной ход головки. Для повышения качества обработанной поверхности число оборотов хонинговальной головки не должно быть кратно числу ее двойных ходов. При этом режущие зерна брусков при возвратно-

Хонинговальные головки должны обеспечивать: а) высокую точность размеров и формы обрабатываемого отверстия; б) возможность самоустанавливания головки и абразивных брусков соответственно в случае несовпадения осей обрабатываемого отверстия и шпинделя станка, а также для исправления формы обрабатываемого отверстия и компенсации неравномерного изнашивания брусков; в) возможность сжатия абразивных брусков после остановки хонинговальной головки.

В хонинговальных головках должен быть предусмотрен специальный механизм, позволяющий осуществлять радиальную подачу (разжим) брусков. Привод такого механизма может быть: ручной, механический или гидравлический. Последний является наиболее эффективным, так как обеспечивает постоянное давление на бруски и большую производительность.

Разжим брусков хонинговальных головок осуществляют с помощью конусов, которые упираются в колодки с закрепленными на них абразивными брусками. В практике чаще всего встречаются головки с двумя конусами (рис.13.20,в). Головки с тремя и более конусами применяются для обработки глубоких отверстий.

Конструкция хонинговальной головки с шарнирами Гука 1 и 5 показана на рис.13.20,б. У этой головки привод механизма разжима встроен в шпиндельную бабку станка и соединен со стержнем 2. Поступательное движение от привода передается толкателю 3 и через шарнирный поводок 4 на корпус хонинговальной головки 6, внутри которого перемещается разжимной конус 7. Последний передает давление на конусные планки 8 и разжимает колодки 9 с брусками. При снятии рабочего давления пружина 10 приподнимает толкатель, и колодки с брусками сжимаются под действием кольцевых пружин 11.

Крепление абразивных брусков к колодкам осуществляют механическим способом, приклеиванием или припаиванием (рис.13.22). В последнее время абразивные бруски применяются сравнительно редко ввиду их относительно низкой стойкости. Чаще всего применяют алмазные и эльборовые бруски. Так, например, при обработке заготовок из серого чугуна и термообработанной стали рекомендуются бруски из синтетических алмазов АС4, АС6 и из эльбора ЛО, ЛП. Зернистость алмазных брусков для предварительной обработки - 250/200...125/100, а для окончательной обработки - 100/80...50/40. Алмазные бруски изготавливают на металлических М1, МО13 и органических Б1, Т02 связках. Зернистость эльборовых брусков для предварительной обработки - 25...12, а для окончательной обработки - 10...4. Концентрация: для предварительной обработки 100% и реже 50%, для окончательной обра-

ботки – 100...200 %. Эльборовые бруски изготавливают на керамической С10 и органической Б1 связках. Применяют также эльборовые бруски на керамической связке твердостью СТ, Т и структуры 5...8.

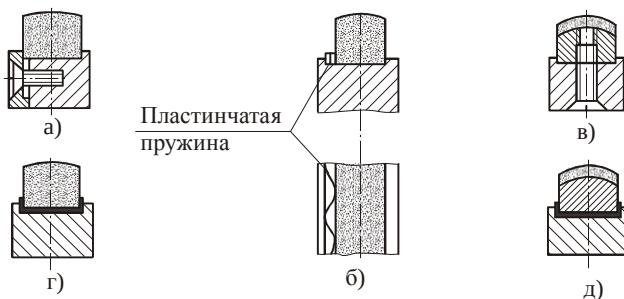


Рис.13.22. Крепление абразивных и алмазных брусков к колодкам хонинговальной головки: а...в – механическая; г – приклеиванием; д – припайванием

Суперфинишные головки применяют для окончательной обработки валов мелкозернистыми абразивными брусками, совершающими колебательные движения. При этом благодаря уменьшению шероховатости до $Rz\ 0,05\ldots0,6\ \mu\text{м}$, некруглости до $0,2\ldots0,7\ \mu\text{м}$ и волнистости до $0,05\ldots0,2\ \mu\text{м}$ обработанные поверхности надежно удерживают смазку и имеют значительно большую, чем после шлифования, фактическую опорную площадь (до 95% номинальной площади).

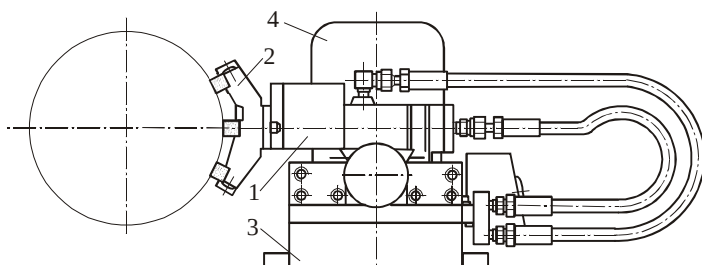


Рис.13.23. Суперфинишная головка модели СФГ-300:
1 – механизм осциллирования; 2 – держатель инструмента; 3 – суппорт станка;
4 – электрооборудование

При отсутствии специальных станков суперфинишные головки устанавливают на универсальных станках (токарных, расточных, шлифо-

вальных и др.) и применяют в единичном и мелкосерийном производствах.

Суперфинишная головка состоит из механизма осциллирования (колебательного движения) 1, держателей инструмента 2, узла крепления головки к суппорту станка 3 и электрооборудования 4 (рис.13.23).

По виду преобразуемой энергии приводы механизмов осциллирования бывают: электромеханические; пневматические и гидравлические. Усилие прижима абразивных брусков осуществляется либо тарированной пружиной, либо с помощью пневмо- или гидроцилиндра.

Сущность процесса суперфиниширования состоит в микрорезании поверхности заготовки одновременно большим количеством мельчайших абразивных зерен. Причем наиболее интенсивное резание происходит при удалении исходной шероховатости, полученной на предшествующей операции. Затем интенсивность процесса снижается примерно вдвое, происходит переход от резания к трению, когда бруски полируют обработанную поверхность, придавая ей очень низкую шероховатость и зеркальный блеск.

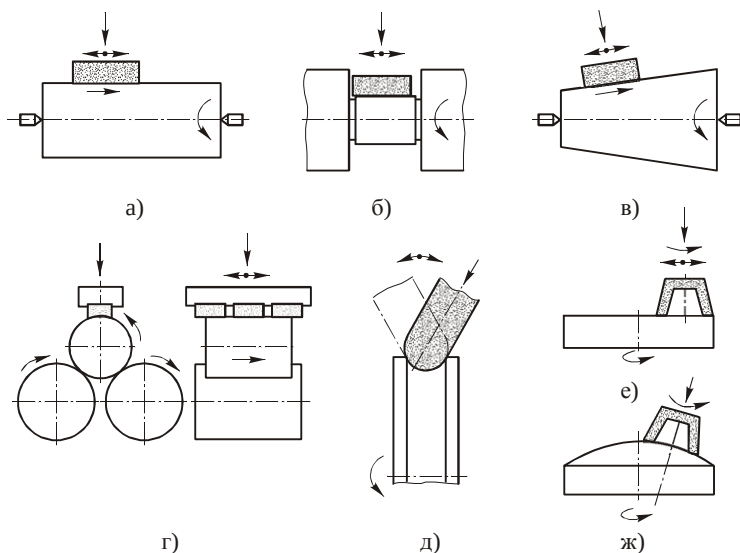


Рис.13.24. Схемы суперфиниширования: а – центровое с продольной подачей; б – центровое врезанием; в – конической поверхности; г – бесцентровое; д – торoidalной поверхности; е, ж – торцовых плоских и сферических поверхностей

По сравнению с другими методами финишной обработки суперфиниширование имеет следующие достоинства: простота применяемого оборудования (универсальные станки); высокие производительность и качество обработанных поверхностей без структурных изменений поверхностного слоя (обусловлено низкими усилиями прижима – 250...300 Н и низкими скоростями резания – 10...100 м/мин); возможность работы по автоматическому циклу с механической загрузкой деталей и активным контролем их размеров.

В зависимости от конструкции детали применяют различные схемы суперфиниширования (рис.13.24).

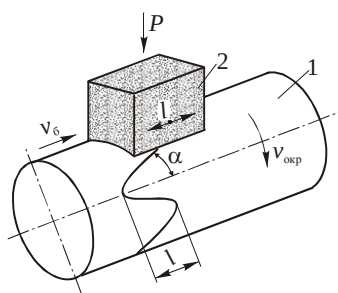


Рис.13.25. Схема суперфиниширования: 1 – заготовка; 2 – абразивный брусок

В отличие от хонингования при суперфинишировании заготовка вращается, а бруски совершают колебательное движение вдоль оси заготовки и возвратно-поступательное движение вдоль этой же оси (рис.13.25). В результате сложения указанных движений на обработанной поверхности остаются синусоидальные следы от прохождения абразивных зерен. Пути абразивных зерен пересекаются и образуют сетку диагонально-скрещивающихся следов, которая на окончательно обработанной поверхности почти не видна.

Угол наклона α траектории движения абразивного зерна (угол сетки), образуемый касательной к синусоидальной кривой в точке ее пересечения с осью заготовки, является критерием, характеризующим процесс суперфиниширования (рис.13.25):

$$\operatorname{tg} \alpha = v_{\text{окр}} / v_{\text{б}} = \pi D n_3 / 2 \ell n_6 ,$$

где $v_{\text{окр}}$ – окружная скорость заготовки, м/с; $v_{\text{б}}$ – средняя скорость колебания бруска, м/с; D – диаметр заготовки, мм; n_3 – частота вращения заготовки, мин⁻¹; ℓ – размах колебаний бруска, мм; n_6 – частота колебаний бруска, дв.ход/мин.

Угол сетки оказывает большое влияние на производительность и качество обработанной поверхности, причем наиболее интенсивное резание и наибольшая производительность достигается при $\alpha = 30 \dots 50^\circ$.

Эффективность суперфиниширования в значительной мере зависит от правильного выбора размеров брусков. При этом исходят из того, что

для исправления исходной волнистости и огранки необходимо, чтобы длина и ширина рабочей поверхности бруска были больше длины волны соответственно в продольном и поперечном сечениях заготовки. На практике рабочую ширину бруска выбирают в зависимости от диаметра заготовки (рис.13.26,а). Однако если используются бруски шириной более 25 мм, то это приводит к затруднению доступа СОЖ в зону обработки и удаления отходов, что, в свою очередь, приводит к ухудшению качества обработанной поверхности.

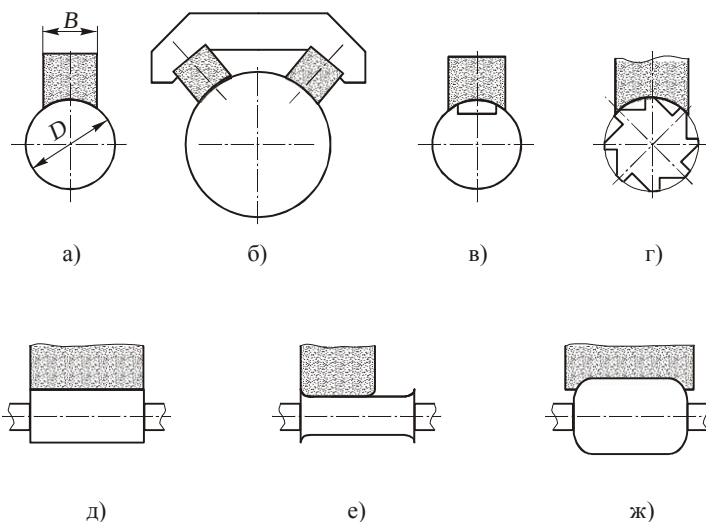


Рис.13.26. Формы и размеры рабочих поверхностей брусков для суперфиниширования: а – заготовка малого диаметра; б – заготовка большого диаметра; в, г – заготовки с пазами; д...ж – короткие заготовки

Для обработки заготовок больших диаметров применяют два бруска и более, используя специальные державки (рис.13.26,б). Для обработки заготовок со шпоночными канавками, пазами и окнами ширина бруска должна быть не менее полуторной ширины канавки или паза (рис.13.26,в), а при обработке разверток (рис.13.26,г) под бруском должно одновременно находиться не менее трех зубьев.

Длина бруска при обработке открытых поверхностей с применением продольной подачи должна быть не более 1/3 длины обрабатываемой поверхности. При обработке коротких участков без продольной подачи длина бруска должна быть равна длине обрабатываемой поверхности.

Это способствует получению детали правильной геометрической формы (рис.13.26,д), так как при более коротком бруске образуются вогнутые (рис.13.26,е), а при более длинном бруске – выпуклые (рис.13.26,ж) края, что нежелательно.

Обработку без продольной подачи коротких участков, ограниченных буртиками и уступами, производят брусками, длина которых

$$L = \ell_{\text{обр}} - \ell ,$$

где $\ell_{\text{обр}}$ - длина обрабатываемой поверхности; ℓ - размах колебаний бруска.

При суперфинишировании в качестве абразивных инструментов используют мелкозернистые бруски преимущественно на керамической связке. Их изготавливают методом прессования или литья. Последний метод характеризуется высокой однородностью структуры и большим количеством зерен на рабочей поверхности. Бруски быстро прирабатываются к поверхности заготовки, обладают равномерным износом и хорошей самозатачиваемостью.

Закаленные стали обрабатывают брусками из белого электрокорунда марок 23А, 24А, 25А и карбида кремния зеленого марок 63С, 64С на керамической связке; чугун, цветной металл, сталь незакаленная, специальные стали и сплавы, обладающие высокой пластичностью и малой твердостью – брусками из карбида кремния зеленого марок 63С, 64С.

Алмазными и эльборовыми брусками обрабатывают стальные заготовки высокой твердости, имеющие в своей структуре карбиды, нитриды и другие составляющие, твердость которых близка к твердости обычных абразивных материалов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите основные виды абразивных материалов, их свойства и области применения.
2. Что такое шлифовальные материалы? Их зернистость и как она определяется?
3. Типы абразивных инструментов и их основные характеристики.
4. Что такое структура шлифовальных кругов? От чего зависит выбор номера структуры?
5. Что такое твердость шлифовальных кругов? Как она определяется? Как можно изменить твердость готовых кругов?
6. Роль связки в абразивном инструменте и ее разновидности.
7. Что такое точность и неуравновешенность абразивных инстру-

ментов?

8. Как производится маркировка абразивных и алмазных шлифовальных кругов?
9. В чем заключается явление «засаливания» и осыпания шлифовальных кругов? Их последствия и меры устранения.
10. Способы правки шлифовальных кругов и инструменты, применяемые для правки.
11. Приведите примеры прогрессивных конструкций шлифовальных кругов, особенности их устройства и достоинства.
12. Как производится хонингование отверстий? Какие инструменты применяются для хонингования?
13. В чем суть процесса суперфиниширования и какие устройства применяются для его осуществления?
14. Какие способы и инструменты применяются для резбошлифования? Какими способами и инструментами формируется профиль резбошлифовальных кругов?
15. Как и какими инструментами производится шлифование зубьев цилиндрических и конических колес с прямыми и криволинейными зубьями?
16. Шлифование шлицевых валов и червяков. Схемы шлифования и применяемые инструменты.
17. Особенности скоростного шлифования и требования к устройству кругов для высокоскоростного шлифования.
18. Круги для глубинного шлифования канавок фасонных профилей деталей инструментов. Особенности их конструкций.
19. Достоинства, недостатки и область применения ленточного шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С.* Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 448 с.
2. Высокоскоростная обработка. High Speed Machining (HSM): Справочное пособие. – М.: ИТО, 2001. – 32 с.
3. *Гинзбург Е.Г., Халебский Н.Т.* Производство зубчатых колес. – Л.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
4. *Дибнер Л.Г., Шкурин Ю.П.* Заточка спиральных сверл. – М.: Машиностроение, 1967. – 156 с.
5. *Иноземцев Г.Г.* Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
6. *Калашиников С.Н.* Зуборезные резцовые головки. – М.: Машиностроение, 1972. – 162 с.
7. *Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В.И.* Инструменты для обработки точных отверстий. – М.: Машиностроение, 2003. – 330 с.
8. *Кожевников Д.В., Кулешова И.В., Левин В.И. и др.* Современные конструкции сборного инструмента с многогранными неперетачиваемыми пластинами: Обзор. – М.: НИИмаш, 1979. – 56 с.
9. *Кожевников Д.В.* Современная технология и инструменты для обработки глубоких отверстий: Обзор. – М.: НИИмаш, 1981. – 60 с.
10. *Мазальский В.Н.* Суперфинишные станки. – Л.: Машиностроение, 1988. – 127 с.
11. *Малышко В.Ю.* Заточка оптимальных углов на резцах // Вестник машиностроения. – 1982. – №5. – С.56–59.
12. *Маслов А.Р.* Приспособления для металлообрабатывающего инструмента: Справочник. – М.: Машиностроение, 1996. – 240 с.
13. Металлорежущие инструменты/ Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
14. *Попов С.А.* Заточка и доводка режущего инструмента. – М.: Высшая школа, 1986. – 223 с.

-
15. *Потанов В.А.* Применение механической обработки с минимальным количеством СОЖ на германских заводах// *Машиностроитель*. – 1999. – №11. – С. 46 – 52.
16. Прогрессивные методы хонингования/ *С.И.Куликов, Ф.Ф.Ризванов, В.А.Ковальчук, С.В.Ковалевский*. – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
17. Производство зубчатых колес: Справочник/ *С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И.Коган и др.*; Под общ. ред. *Б.А.Тайца*. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
18. Протяжки для обработки отверстий / *Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др.* – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
19. Резание и инструмент / Под ред. *А.М. Розенберга*. – М.: Машиностроение, 1964. – 228 с.
20. *Родин П.Р.* Металлорежущие инструменты. – Киев: Вища шк., 1986. – 456 с.
21. *Романов В.Ф.* Расчеты зуборезных инструментов. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.
22. *Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н.* Проектирование металлорежущих инструментов. – М.:Машгиз, 1962. – 952 с.
23. Справочник инструментальщика / *И.А.Ординарцев, Г.В.Филиппов, А.Н.Шевченко и др.*; Под общ. ред. *И.А.Ординарцева*. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
24. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общ. ред. *В.И. Баранчикова*. – М.: Машиностроение, 1994. – 560 с.
25. *Фрайфельд И.А.* Расчеты и конструкции специального металлорежущего инструмента. Фасонные резцы, фасонные фрезы, червячные фрезы для зубчатых деталей. – М.;Л.: Машгиз, 1959. – 195 с.
26. *Хлебалин Н.Ф.* Нарезание конических зубчатых колес/ Под ред. *Е.Г.Гинзбурга*. – Л.: Машиностроение, 1978. – 160 с.
27. *Щеголев А.В.* Конструирование протяжек. – М.;Л.: Машгиз, 1960. – 352 с.
28. *Эфрос М.Г., Миронюк В.С.* Современные абразивные инструменты / Под ред. *З.И.Кремня*. – Л.: Машиностроение, 1987. – 158 с.
29. *Якухин В.Г.* Оптимальная технология изготовления резьб. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ	7
1.1. Основные части и конструктивные элементы режущих инструментов	7
1.2. Способы крепления режущих инструментов на станках	11
1.3. Материалы, применяемые для изготовления режущих инструментов	18
1.4. Основные направления совершенствования режущих инструментов	28
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	34
2. РЕЗЦЫ	35
2.1. Конструктивные элементы и геометрические параметры проходных токарных резцов	35
2.2. Особенности конструкции резцов других типов	39
2.3. Способы стружкозавивания и стружколомания при конструировании токарных резцов	48
2.4. Фасонные резцы	50
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	59
3. ПРОТЯЖКИ	61
3.1. Назначение, основные типы и области применения протяжек	61
3.2. Протяжки для обработки отверстий	64
3.3. Расчет протяжек для обработки круглых отверстий	73
3.4. Особенности расчета протяжек для обработки фасонных отверстий	78
3.5. Особенности конструкций протяжек для обработки наружных поверхностей	85
3.6. Использование твердых сплавов для оснащения протяжек	89
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	92
4. СВЕРЛА	93
4.1. Перовые сверла	93

4.2. Спиральные сверла	95
4.3. Недостатки геометрии спиральных сверл и способы ее улучшения при заточке	109
4.4. Особенности конструкций твердосплавных сверл	111
4.5. Сверла для сверления глубоких отверстий.....	114
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	126
5. ЗЕНКЕРЫ.....	128
5.1. Цилиндрические зенкеры.....	129
5.2. Зенковки	136
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	138
6. РАЗВЕРТКИ.....	139
6.1. Развертки цилиндрические. Конструктивные и геометрические параметры	140
6.2. Особенности конструкций других типов разверток	147
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	156
7. РАСТОЧНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ	157
7.1. Расточные инструменты.....	157
7.2. Комбинированные режущие инструменты для обработки отверстий.....	165
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	169
8. ФРЕЗЫ.....	170
8.1. Конструкции зубьев фрез. Их достоинства и недостатки	171
8.2. Особенности конструкций фрез с остроконечными зубьями	175
8.3. Особенности конструкций фрез, оснащенных твердым сплавом	186
8.4. Фрезы с затылованными зубьями.....	197
8.5. Определение профиля затыловочного резца для фрез с положительным передним углом	204
8.6. Фрезы с двойным затылованием зубьев	207
8.7. Конструктивные параметры дисковых фрез с затылованными зубьями	208
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	210

9. РЕЗЬБООБРАЗУЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ	211
9.1. Резьбовые резцы и гребенки	211
9.2. Резьбонарезные фрезы.....	218
9.3. Метчики	226
9.6. Инструменты для накатывания резьбы.....	262
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	273
10. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС	274
10.1. Основные сведения об эвольвентном зацеплении	275
10.2. Зуборезные инструменты, работающие по методу копирования	289
10.3. Червячные зуборезные фрезы	300
10.4. Зуборезные долбяки.....	322
10.5. Шеверы	344
10.6. Обкаточные инструменты для деталей с неэвольвентным профилем	360
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	375
11. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЬЕВ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС.....	379
11.1. Основные сведения о конических передачах и параметрах зубчатых колес.....	380
11.2. Методы и инструменты, применяемые для нарезания зубьев конических колес	383
11.3. Инструменты для нарезания конических колес с прямыми зубьями.....	386
11.4. Инструменты для нарезания конических колес с криволинейными зубьями.....	394
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	407
12. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА	408
12.1. Виды автоматизированных производств и основные требования к инструментам, применяемым в них	408
12.2. Режущие инструменты, применяемые в автоматизированном производстве.....	410
12.3. Вспомогательные инструменты	414

12.4. Система инструментальной оснастки для станков с ЧПУ и ГПС	418
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	421
13. АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ	422
13.1. Технические характеристики абразивных инструментов и основы выбора шлифовальных кругов	422
13.2. Профилирование и правка шлифовальных кругов	432
13.3. Некоторые специальные конструкции абразивных инструментов	437
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	458
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	460