

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЁВА»**

**Кафедра технологий производства двигателей**

# **НАРЕЗАНИЕ И ОТДЕЛКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

*Разработал:  
Профессор Скуратов  
Д.Л.*

# НАРЕЗАНИЕ И ОТДЕЛКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Зубчатая передача** – это механизм, предназначенный для передачи с помощью зацепления вращательного движения между параллельными, пересекающимися и перекрещивающимися валами или для преобразования вращательного движения в поступательное с изменением угловых скоростей и моментов.

Зубчатые колёса имеют весьма широкий спектр назначения и подразделяются на: **силовые, скоростные, отсчётные и общего назначения**. **Силовые передачи** предназначены для передачи значительных крутящих моментов при малых числах оборотов зубчатых колес и применяются в основном в различных подъёмно-транспортных механизмах. **Скоростные передачи** позволяют работать при скоростях до 150 м/с, например, в редукторах вертолётов и турбовинтовых двигателей самолётов. **Отсчётные передачи**, используемые в счётно-решающих механизмах, следящих приводах приборов и т.д., обеспечивают точную согласованность ведущего и ведомого зубчатых колес. Передачи **общего назначения** предназначены, как правило, для работы при малых нагрузках и скоростях.

Профиль боковых поверхностей зуба может быть выполнен по **эвольвенте, циклоиде, дуге окружности** и т.п. При этом наибольшее распространение в машиностроении получили зубчатые колёса с эвольвентным профилем.

Зубчатые колеса можно получать литьем, методом **пластического деформирования**, а именно: штамповкой и накаткой как в горячем, так и холодном состоянии, и **обработкой резанием**. При этом методы литья и деформирования заготовок позволяют получать зубчатые колеса не выше 8-й степени точности, поэтому основным методом изготовления зубчатых колес, особенно в авиадвигателестроении, является зубонарезание. Нарезание зубчатых колес может осуществляться **методом копирования и методом обкатки**.

# НАРЕЗАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ

Сущность *метода копирования* заключается в том, что профиль впадин между зубьями является точной копией профиля режущих кромок зубообразующего инструмента (при нарезании прямозубых цилиндрических и конических колес). К основным инструментам, работающим по методу копирования, относятся: *дисковые и пальцевые модульные фрезы, зубодолбежные головки и круговые протяжки*. Первые два вида инструментов достаточно широко применяются в индивидуальном мелкосерийном и ремонтном производствах.

*Дисковые модульные фрезы* предназначены для обработки прямозубых и косозубых цилиндрических колес, шевронных колес с канавкой на ободе (для выхода инструмента) и прямозубых конических колес

При обработке прямозубых колес дисковые фрезы работают методом копирования, косозубых и шевронных – методом бесцентроидного огибания, когда профиль фрезы ни в какой момент огибания не совпадает с профилем окончательно нарезанной впадины.

Инструментальной промышленностью дисковые модульные фрезы изготавливаются комплектами, состоящими из 8, 15 и 26 инструментов каждого модуля. Наибольшее распространение получили комплекты, состоящие из 8 и 15 фрез.

В соответствии с ОСТ 2 И41-14-87 дисковые модульные фрезы изготавливаются наборами для нарезания колес 10-й степени точности с модулями  $m = 1...16$  мм. Эти фрезы имеют наружные диаметры  $d_0 = 50...180$  мм, диаметры посадочного отверстия  $d = 19... 50$  мм, число зубьев  $z = 14...10$  и ширину  $b = 4...53$  мм. По этому стандарту дисковые фрезы изготавливаются и с «половинными» номерами (1,  $1\frac{1}{2}$ , 2,  $2\frac{1}{2}$ ,  $3\frac{1}{2}...7\frac{1}{2}$ , 8).

ГОСТ 13838-68 регламентирует дисковые мелко модульные фрезы для нарезания цилиндрических колес 9-й степени

точности и ниже модулей  $m = 0,2...0,9$  мм в комплекте из 8 и 15 инструментов. Так как при разных диаметрах профили зубьев колес, имеющих разное число зубьев, неодинаковы, то для нарезания методом копирования колеса с определенным числом зубьев требуется отдельная фреза со своим профилем. Для нарезания колес с  $z = 12$  и  $z = \infty$ , надо иметь теоретически бесконечное число дисковых модульных фрез.

Практически поступают следующим образом. Вычерчивают профили колес с  $z = 12$  и  $z = \infty$ , полученную максимальную разницу делят на 8 или 15 частей и определяют, какому числу зубьев соответствуют профили 1, 2, 3...8 (рис. 1). Например, профиль 4 в точности соответствует профилю колеса с  $z = 21$ , а профиль 5 -  $z = 26$ , поэтому фреза с профилем 4 предназначена для колес с  $z = 21...25$ , а фреза с профилем 8 – для колес с числом зубьев  $z = 135$  и зубчатых реек ( $z = \infty$ ) [1].

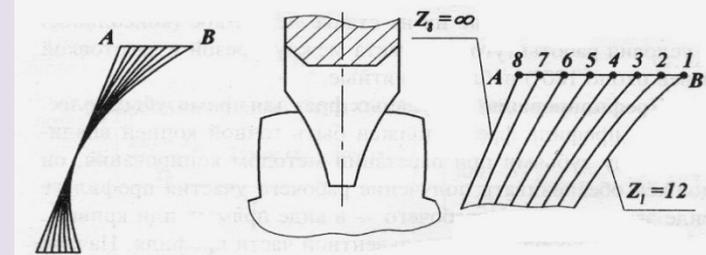
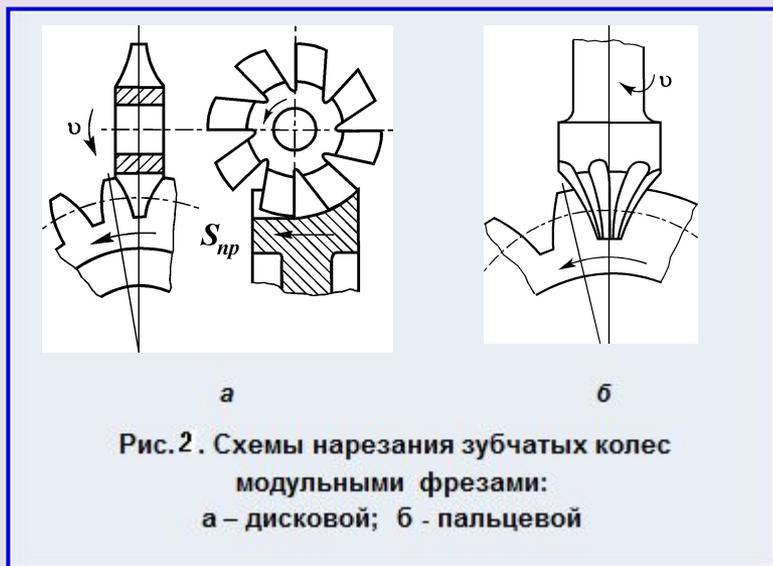


Рис. 1. Формы боковых сторон зубчатого колеса с разным числом зубьев [1]

Построение профилей фрез стандартных наборов по этой схеме закладывает погрешности нарезания колес, поэтому дисковыми модульными фрезами можно получать колеса не выше 9-й степени точности. Кроме того, возникают ещё погрешности, связанные с делительным поворотом заготовки.

При работе *дисковой или пальцевой модульными фрезами* последние совершают вращательное (главное) движение, а заготовка выполняет поступательное движение (движение подачи) вдоль обрабатываемой впадины зуба (рис. 2). Как правило, формирование впадины зуба осуществляется за несколько проходов, после чего заготовка с помощью делительной головки поворачивается на один угловой шаг нарезаемого колеса. Нарезание зубчатых колес при работе дисковыми и пальцевыми модульными фрезами осуществляется на универсальных фрезерных станках. Такой способ нарезания зубчатых колес весьма прост, не требует применения специальных зуборезных станков, но отличается невысокой производительностью.



**Пальцевые модульные фрезы** предназначены для нарезания прямозубых, косозубых и шевронных (с числом шевронов 2 и более, рис. 3) зубчатых колес с большим модулем ( $m > 10$ ). Конструктивные элементы фрезы (рис. 4) определяются размерами впадины зубчатого колеса. Обычно их изготавливают диаметром 40...220 мм с четным числом зубьев 2...8. Пальцевые фрезы обычно не изготавливаются в комплекте, так как в этом нет необходимости.



Недостатком фрез является низкая производительность и точность. Низкая производительность объясняется малым числом зубьев, консольным креплением, нерациональной геометрией; низкая точность – погрешностями делительного механизма и искажением профиля при переточках.

Для предварительного нарезания зубьев колес на зубьях пальцевых модульных фрез выполняют стружкоразделительные канавки шириной  $b = 2...4$  мм на расстоянии  $t = 10...30$  мм.

Заточку дисковых и пальцевых модульных фрез производят шлифовальными кругами по передней поверхности с углами:  $\gamma = 0^\circ$  – для чистовых фрез и  $\gamma = 6...8^\circ$  – для черновых фрез. Задний угол на вершине зуба у дисковых фрез обычно составляет  $10...12^\circ$ .

## НАРЕЗАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МНОГОРЕЗЦОВЫМИ ЗУБОДОЛБЕЖНЫМИ ГОЛОВКАМИ

Одним из высокопроизводительных и точных методов нарезания зубчатых колес, базирующимся на копировании профиля режущего инструмента, является формообразование зубчатого венца при помощи **многорезцовых зубодолбежных головок** (рис. 5). Данный метод позволяет изготавливать зубчатые колёса 7...8 степени точности. Отличительной особенностью данного метода является то, что долбятся одновременно все впадины обрабатываемого колеса.

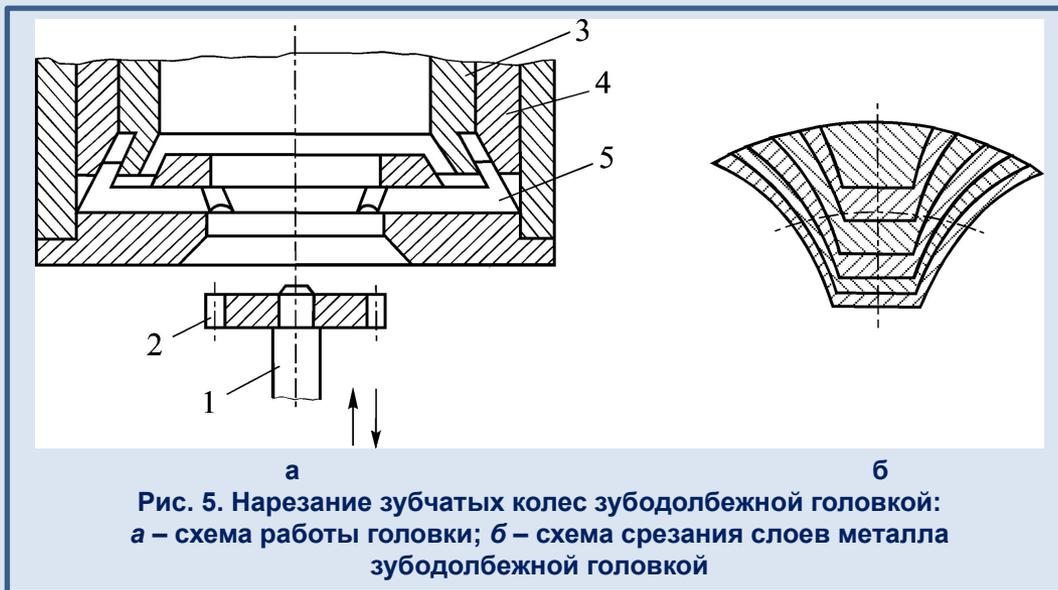


Рис. 5. Нарезание зубчатых колес зубодолбежной головкой:  
а – схема работы головки; б – схема срезания слоев металла  
зубодолбежной головкой

При нарезании зубчатого колеса при помощи многорезцовой зубодолбежной головки (рис. 5) заготовка 2 устанавливается на штосселе станка 1 и получает вертикальное возвратно-поступательное движение, которое является главным. При этом призматические фасонные резцы 5, установленные в радиальных пазах корпуса, перед каждым рабочим ходом заготовки, т.е. перед её движением вверх, получают перемещение в радиальном направлении (движение подачи). Количество резцов равно числу зубьев нарезаемого колеса. Перемещение резцов осуществляется за счет опускания конусов 3 и 4 на величину от  $S_{рад} = 0,5$  мм/дв.ход, на начальном этапе нарезания, до  $S_{рад} = 0,03$  мм/дв.ход, на конечном этапе. С целью исключения трения резцов об обработанную поверхность перед холостым ходом последние отводятся от заготовки на 0,5 мм с помощью конуса отвода 3. Скорость резания при работе многорезцовыми зубодолбежными головками составляет 3...10 м/мин и зависит от условий обработки. Такие головки рассчитаны на нарезание зубчатых колес диаметром до 250 мм и модулем от 2 мм до 10 мм. Неоспоримым преимуществом данного метода по сравнению с зубофрезерованием червячными модульными фрезами и зубодолблением долбьяками является высокая производительность обработки. К недостатку данного метода следует отнести то, что для изготовления зубчатого колеса с определенным числом зубьев и модулем требуется своя индивидуальная головка, Следует отметить, что эти головки сложны в изготовлении и, следовательно, дороги. Поэтому многорезцовые зуборезные головки экономически выгодно использовать в крупносерийном и массовом производствах.

## НАРЕЗАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КРУГОВЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

По методу копирования работают также **круговые протяжки**, предназначенные для нарезания прямозубых цилиндрических и конических зубчатых колёс (рис. 6). Данный метод обработки отличается высокой производительностью – в 5...8 раз выше, чем на зубострогальных станках.

При нарезании каждой из впадин зубчатого колеса 5 последнее остается неподвижным, а круговая протяжка вращается с постоянной скоростью, т.е. совершает главное движение резания и в некоторые периоды времени совершает равномерное поступательное движение относительно колеса (заготовки), осуществляя тем самым движение продольной подачи. Нарезание каждой из впадин выполняется за один оборот круговой протяжки, представляющей из себя диск, на периферии которого расположены черновые, получистовые и чистовые (калибрующие) зубья. Первый черновой зуб обозначен цифрой 1, а последний чистовой зуб – цифрой 3. Как видно из рис. 6, на диске протяжки имеются два участка, обозначенные 2 и 4, незаполненные зубьями. На участке 2 может быть установлено специальное приспособление для снятия фасок с боковых поверхностей зуба, а участок 4 позволяет повернуть заготовку на один зуб без отвода её от протяжки после прорезания впадины зуба. По завершении нарезания зубчатого венца колеса, последнее отводится от протяжки и снимается со станка, после чего

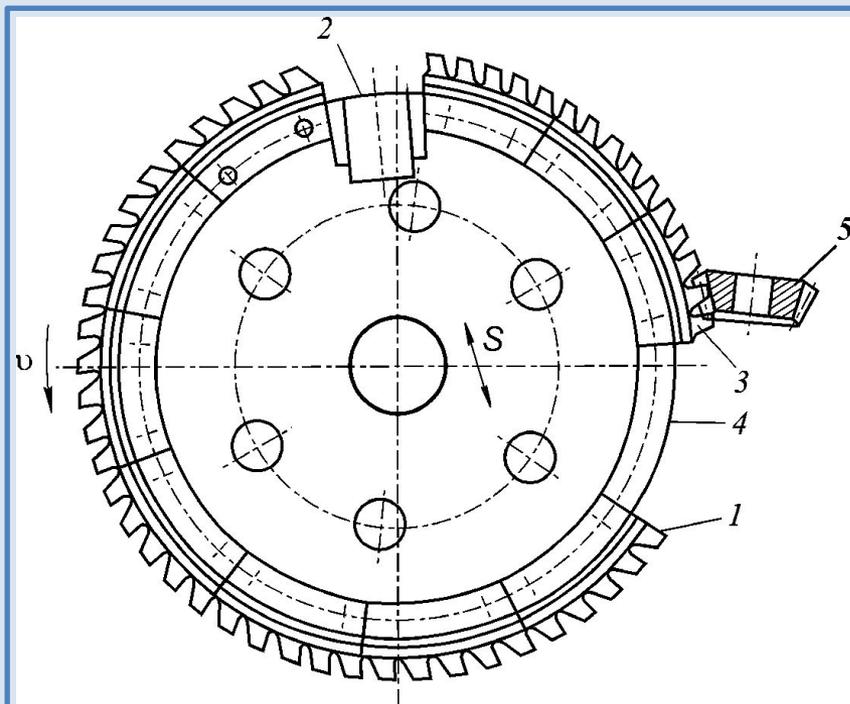


Рис. 6. Схема нарезания конического прямозубого колеса круговой протяжкой:

1- первый черновой зуб; 2, 4 – участки не заполненные зубьями; 3 – последний чистовой зуб; 5 – нарезаемое зубчатое колесо

цикл обработки повторяется, т.е. нарезается новое зубчатое колесо. Скорость резания при круговом протягивании составляет 15...25 м/мин, а время обработки одной впадины – 2...6 с.

## НАРЕЗАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ ОБКАТКИ

При нарезании зубчатых колес *методом обкатки* воспроизводится имитация зацепления зубчатой передачи, а именно: двух зубчатых колес, червяка и червячного колеса или зубчатого колеса и рейки. При этом один из двух элементов, входящих в зубчатую пару, является заготовкой, а другой трансформирован в зуборежущий инструмент. Преимуществом данного метода обработки по сравнению с методом копирования является то, что используя его одним режущим инструментом можно с высокой точностью нарезать зубчатые колеса с разным числом зубьев, но одного модуля. Кроме того, метод обкатки характеризуется высокой производительностью. Нарезание зубчатых колес по методу обкатки осуществляется на специальных зуборезных станках *червячными модульными фрезами, зуборезными долбяками и гребенками, зубострогальными резцами, зуборезными головками и т.д.*

## НАРЕЗАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЧЕРВЯЧНЫМИ МОДУЛЬНЫМИ ФРЕЗАМИ

*Червячными модульными фрезами* можно нарезать как цилиндрические прямозубые и косозубые (винтовые) зубчатые колеса, так и червячные колеса. В процессе обработки заготовки воспроизводится имитация зацепления червяка с червячным колесом.

Червячная модульная фреза представляет собой червяк с профилем резьбы в виде зуборезной рейки, превращенный в режущий инструмент путем прорезания стружечных канавок, а также затылования и заточки полученных зубьев.

При нарезании цилиндрических прямозубых зубчатых колес ось червячной модульной фрезы устанавливается под углом к плоскости, перпендикулярной оси вращения заготовки (рис. 7, а). При этом величина угла  $\varphi$  равна углу подъема винтовой линии фрезы  $\gamma_{м0}$  а её делительном цилиндре. При нарезании цилиндрических колес с винтовым зубом (рис. 7, б) величина угла  $\varphi$  может быть определена по формуле,

$\varphi = \beta \pm \gamma_{м0}$ , где  $\beta$  – угол наклона винтовой линии зуба нарезаемого зубчатого колеса. В указанной формуле знак «плюс» следует принимать при разноименном наклоне зубьев червячной фрезы и нарезаемого зубчатого колеса, а знак «минус» – соответственно при одноименном наклоне. В случае нарезания червячных колес ось фрезы устанавливается горизонтально, т.е. угол  $\varphi = 0^\circ$  (рис. 7, в).

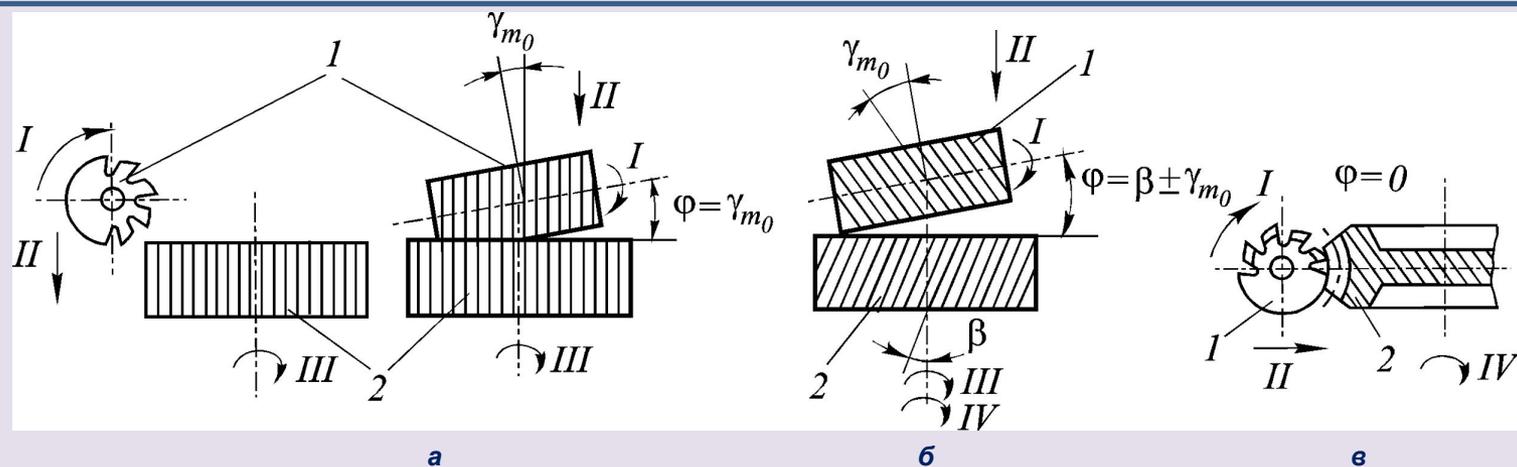
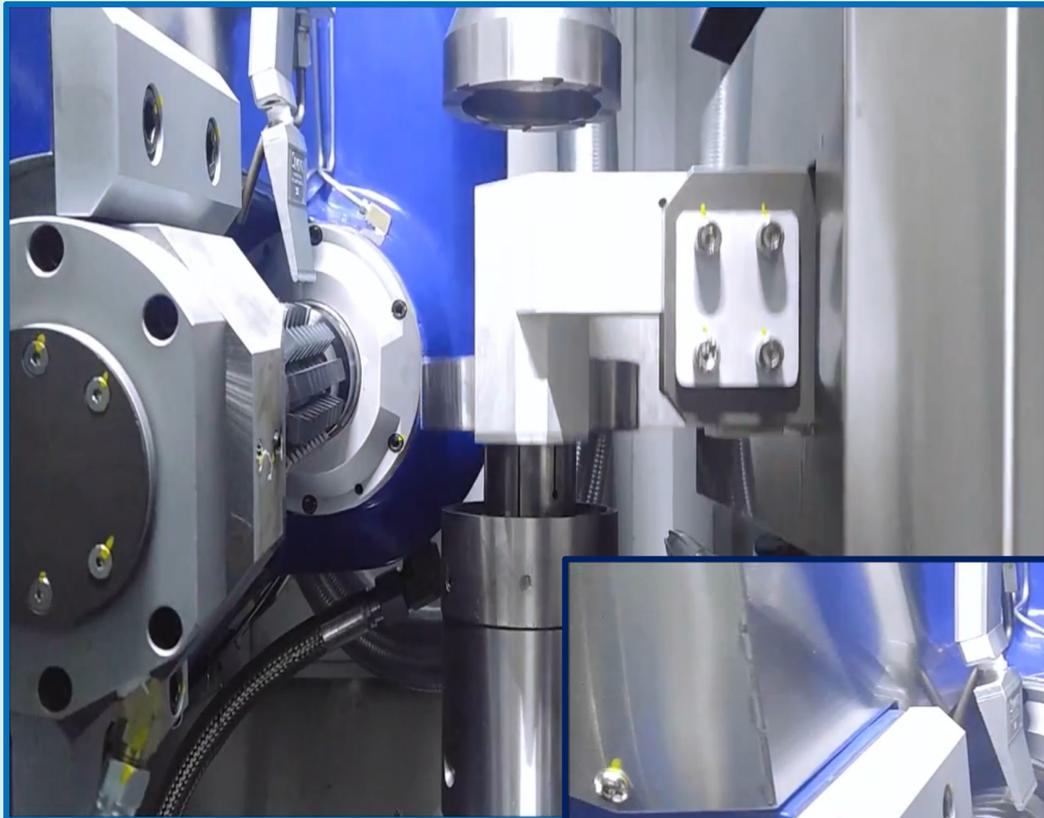


Рис. 7. Схемы работы червячной модульной фрезы:

а – при нарезании цилиндрических прямозубых колес; б – при нарезании цилиндрических колес с винтовым зубом; в – при нарезании червячных колес; 1 – фреза; 2 – заготовка

В процессе нарезания зубчатых колес фреза получает вращательное движение  $I$  вокруг своей оси, которое является главным, и поступательное, являющееся движением подачи. При нарезании цилиндрических колес подача имеет вертикальное направление. Причем при встречном фрезеровании она направлена вниз (рис. 7, а, движение  $II$ ), а при попутном фрезеровании – вверх. В случае нарезания червячных колес подача имеет радиальное направление (рис. 7, в). При нарезании цилиндрических прямозубых и червячных колес заготовка, закреплённая на столе станка, получает только вращательное движение  $III$  вокруг своей оси, которое строго согласовано с вращением червячной фрезы. Обеспечение этого согласованного движения обеспечивает цепь деления зубофрезерного станка. При этом следует отметить, что условие согласования вращения червячной фрезы и заготовки вытекает непосредственно из условия работы червячной пары, а именно: за один оборот фрезы заготовка должна повернуться в окружном направлении на  $k/z$  делительной окружности, где  $k$  – число заходов червячной фрезы,  $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Отличительной особенностью нарезания зубчатых колес с винтовыми зубьями по сравнению с прямозубыми является то, что к рассмотренным ранее трем движениям следует добавить дополнительное движение  $IV$  (рис. 7, б), которое может быть направлено как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки и зависит от направления линии зуба фрезы и нарезаемого колеса.



**a**



**б**

**Рис. 8. Нарезание зубчатого колеса на зубофрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ HERA 350:  
а – установка заготовки; б – процесс обработки**

Скорость резания при зубофрезеровании зависит от стойкости режущего инструмента  $T$ , модуля нарезаемого колеса  $m$  и вертикальной подачи  $S_v$ . Эмпирическая зависимость, связывающая скорость резания с указанными ранее параметрами процесса имеет следующий вид:

$$v = \frac{C'_v}{T^m S_v^{x_v} m^{y_v}} k_v$$

где  $C'_v$  – коэффициент;  $k_v$  – коэффициент;  $x_v, y_v$  – показатели степеней.

Период стойкости червячных модульных фрез обычно находится в диапазоне от 180 до 500 мин и назначается в зависимости от модуля фрез. Величина вертикальной подачи определяется требованиями, предъявляемые к точности зубчатых колес и шероховатости поверхности боковых поверхностей зубьев, и может изменяться от 0,5 до 5 мм на один оборот заготовки.

Основное (машинное) время, необходимое для нарезания зубчатого колеса, определяется по формуле, мин:

где  $L$  – длина прохода;  $T_{оск} = \frac{Lz}{n_{см} S_v k}$  – время, состоящая из длины зуба нарезаемого колеса;  $z$  – количество зубьев нарезаемого колеса;  $n_{см}$  – частота вращения стола;  $i$  – количество оборотов фрезы;  $k$  – коэффициент.

$L$  – величины перебега инструмента, мм;  $i$  – число зубьев нарезаемого колеса;  $n_{см}$  – число оборотов стола;  $i$  – число оборотов фрезы;  $k$  – коэффициент.

Инструментальной промышленностью в соответствии с ГОСТ 9324-80 (в ред. 1992 г.) червячные модульные фрезы изготавливаются трех типов и шести классов точности с  $m = 1...25$  мм. Тип 1 – фрезы цельные прецизионные с  $m = 1...10$  мм классов точности AAA, AA и наружным диаметром  $d_{\text{ф0}} = 71...180$  мм. Тип 2 – фрезы цельные общего назначения  $m = 1...20$  мм классов точности AA, A, B, C, D с  $d_{\text{ф0}} = 40...250$  мм. Тип 3 – фрезы сборные  $m = 8...25$  мм классов точности A, B, C, D с  $d_{\text{ф0}} = 180...340$  мм. Рекомендуемое назначение фрез: класс AAA для колес 5 и 6 степеней точности; AA – для колес 7-й степени точности, класс A – для зубчатых колес 8-й степени точности; классы B, C, D – соответственно для колес 9, 10, 11-й степеней точности.

По конструктивному исполнению фрезы бывают насадные и хвостовые (рис. 9).



Рис. 9. Фрезы червячные модульные: а – хвостовая; б – насадная

Помимо цельных фрез в производстве используются также и сборные фрезы (рис. 10).



Рис. 10. Сборные червячные модульные фрезы

Для изготовления червячных модульных фрез применяют как быстрорежущие стали (P6M5, 10P6M5, P9K10, P6M5K5 и др.) так и твердые сплавы (BK6-M, BK8, BK10-OM, T5K10 и др.). Выбор марки инструментального материала зависит от материала нарезаемого колеса.

По виду исходного червяка положенного, в основу червячной фрезы, они могут быть эвольвентными, архимедовыми и конволютными для нарезания колес с эвольвентным зацеплением. Если в сечении перпендикулярном оси червяка, получается эвольвента, червяк называется эвольвентным; если архимедова кривая – архимедов червяк; если же получается укороченная или удлиненная эвольвента, то червяк конволютный. Все эти винтовые поверхности линейчатые, т.к. образуются винтовым движением прямой линии, определенно ориентированной в пространстве [2].

С эвольвентным зубчатым колесом из винтовых поверхностей геометрически правильно сцепляется только эвольвентный червяк. Однако из-за затылования зубьев режущие кромки не лежат на боковых эвольвентных винтовых поверхностях. Кроме того, методом радиального затылования невозможно получить эвольвентные винтовые поверхности. В связи с этим эвольвентные червячные фрезы практически не изготавливают.

Второе место по точности занимают фрезы на основе архимедова червяка. В настоящее время точные и прецизионные червячные фрезы делают только архимедовыми с углом профиля исходного червяка, равным углу профиля эвольвентного червяка в осевом сечении.. Наименее точными являются фрезы на основе конволютных червяков [2].

Основными параметрами, которыми характеризуются червячные модульные фрезы, являются (рис. 11, а-в): наружный диаметр  $d_{a0}$ , делительный диаметр  $d_{m0}$ , диаметр посадочного отверстия  $d$ , число зубьев фрезы  $z_0$ , число заходов фрезы  $k$ , длина фрезы  $L$ , угол подъема винтовой канавки  $\gamma_{m0}$ , угол наклона стружечных канавок  $\lambda_{m0}$ , полная высота зуба  $H$ ; высота профиля зуба  $h_0$ ; толщина зуба в нормальном сечении  $S_{n0}$ , ширина впадины в нормальном сечении  $S_{k0}$ , величина первого падения затылка  $K$ , величина второго падения затылка  $K_1$ , углы режущих кромок:  $\gamma$ ,  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_\varepsilon$ .

Наружный диаметр фрезы  $d_{a0}$  является одним из важнейших параметров червячной модульной фрезы, влияющим на её функциональные параметры. Увеличение диаметра фрезы  $d_{a0}$  благоприятно сказывается на процессе зубонарезания зубчатых колес, так как при этом уменьшается угол подъема витков

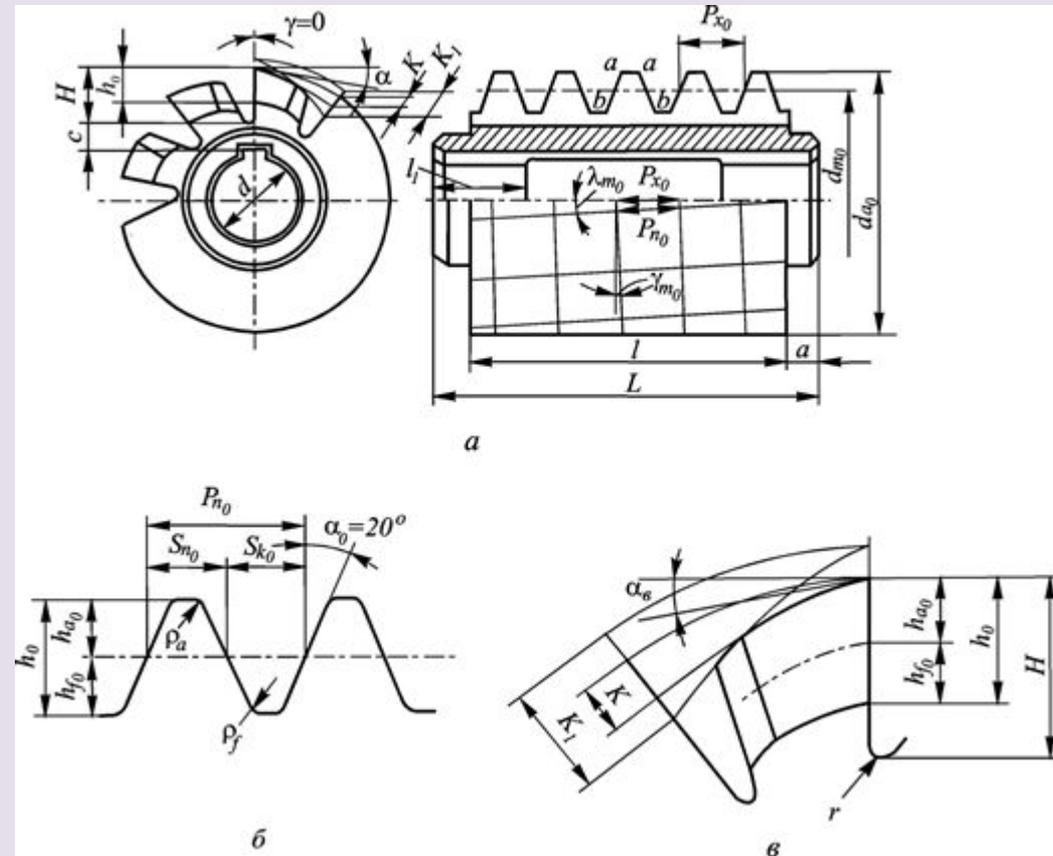


Рис. 11. Червячная модульная фреза: а – конструктивные элементы и геометрические параметры; б – профиль зуба в нормальном сечении; в – параметры зуба червячной фрезы

$\gamma_{m0}$  и соответственно повышается точность обработки, повышается стойкость режущего инструмента и производительность обработки.

В то же время увеличение  $d_{a0}$  приводит к увеличению расхода инструментального материала, росту величины крутящего момента на шпинделе станка, возникновению трудностей при эксплуатации фрез. Диаметр посадочного отверстия  $d$  выбирается из нормального ряда отверстий: 13, 16, 22, 27, 32, 40, 50 мм.

При проектировании фрез должно выдерживаться следующее соотношение

$$d_{a0} \geq d + 2H + 2c,$$

где  $c$  – толщина стенки фрезы.

Червячные модульные фрезы, также как и фасонные фрезы, относятся к группе фрез с затылованной формой зуба, т.е. задняя поверхность на вершине и боковых сторонах каждого зуба очерчена по спирали Архимеда. При этом падение затылка можно определить по зависимости

$$K = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_s,$$

где  $z_0$  – число зубьев фрезы;  $\alpha_s$  – задний угол на вершине зуба.

У червячных модульных фрез, предназначенных для чистовой обработки, зубья шлифуются. Поэтому для обеспечения выхода шлифовального круга делается двойное затылование. Величина второго затылования  $K_1 = (1,2 \dots 1,7)K$  (рис. 11, в).

как видно из рис. 11, каждый зуб фрезы имеет три режущие кромки, одна из которых периферийная  $a-a$ , расположенная на вершине зуба, и две боковые  $a-b$ . Задний угол на вершине зуба, как правило, составляет  $8^\circ \dots 10^\circ$ .

Боковые задние углы  $\alpha_s$  в нормальном сечении к боковым режущим кромкам не должны быть меньше 2 градусов в противном случае возможен их усиленный износ. Величину боковых задних углов можно определить по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \operatorname{tg} \alpha_s \sin \alpha_0,$$

где  $\alpha_0$  – угол зацепления. Передний угол  $\gamma$  для прецизионных и чистовых фрез задается равным нулю, а для черновых фрез составляет  $5 \dots 10^\circ$ .

У червячных модульных фрез высота головки  $h_{a0}$  и высота ножки  $h_{f0}$  назначаются равными 1,25 $m$ , поэтому высота профиля зуба составит  $h_0 = h_{a0} + h_{f0} = 2,5m$  (рис. 11, б, в). Полная высота зуба превышает высоту его профиля и может быть определена по формуле  $H = h_0 + K + r$ , где  $r$  – радиус закругления на дне стружечной канавки.

У фрез, предназначенных для черновой и чистовой обработки зубчатых колес, толщины  $S_{m0}$  зубьев в нормальном сечении различаются. Так у черновых фрез  $S_{m0} = P_{m0} - S_{z0} - \Delta$ , а у чистовых  $S_{m0} = P_{m0} - S_{z0}$ , где  $\Delta$  – припуск на чистовую обработку, который составляет 0,4...1,5 мм.

Величина делительного цилиндра у червячных фрез рассчитывается по формуле  $d_{m0} = d_{a0} - 2h_{a0}$ . Если учесть, что переточка червячных модульных фрез производится по передней поверхности, то по мере роста числа переточек значение  $d_{m0}$  будет уменьшаться, а, следовательно, будет увеличиваться угол подъема винтовой канавки  $\gamma_{m0}$ , что, в свою очередь, приведет к снижению точности нарезания зубчатых колес.

Поэтому с целью обеспечения заданной точности нарезаемых зубчатых колес теоретическую (расчетную) величину  $d_{m0}$  задают для сечения, отстоящего от передней поверхности зуба фрезы на расстоянии равном  $0,1 \dots 0,25$  окружного шага:

$$d_{m0} = d_{a0} - 2h_{a0} - 2\sigma K,$$

$\sigma$  – коэффициент (равный  $0,10 \dots 0,15$  [3]);  $K$  – величина падения затылка.

На производительность и точность нарезания зубчатых колес влияет такой конструктивный параметр фрез, как число заходов. В настоящее время наибольшее распространение получили однозаходные фрезы, однако имеет место опыт применения и многозаходных червячных модульных фрез с числом заходов до  $k = 4$ . В отличие от однозаходных фрез многозаходные фрезы целесообразно применять для предварительного формообразования зубчатых колес, т.е. таких колес, которые в последующем будут подвергнуты зубоотделочной обработке, а именно: шевингованию или шлифованию. Многозаходные фрезы обладают большей стойкостью и позволяют повысить производительность обработки.

Стружечные канавки у червячных фрез могут располагаться как перпендикулярно виткам фрезы ( $\lambda_{m0} = \gamma_{m0}$ ), так и параллельно оси фрезы ( $\lambda_{m0} = 0$ ). Последние фрезы более технологичны в изготовлении и заточке.

Для формообразования червячных зубчатых колес применяют червячные модульные фрезы, параметры ( $d_{a0}, d_{m0}, \gamma_{m0}, m$ ) которых полностью соответствуют параметрам червяков, находящимся в контакте с нарезанными зубчатыми колесами. Эти фрезы чаще всего являются фрезами специального назначения.

## НАРЕЗАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЗУБОРЕЗНЫМИ ДОЛБЯКАМИ

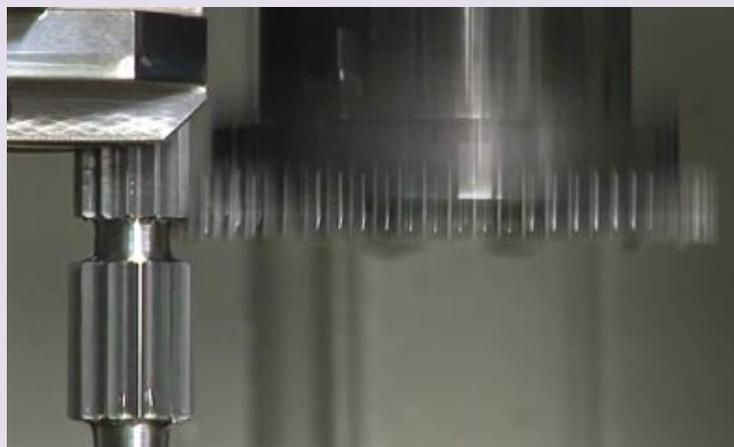
**Зуборезный долбяк** – это режущий инструмент, выполненный в виде корригированного зубчатого колеса, снабженного передними и задними углами на вершине и боковых сторонах зубьев. Такая картина коррекции обеспечивает создание задних углов на боковых режущих кромках долбяка. Задняя поверхность вершинной кромки представляет собой – усеченный конус, создающий на ней задний угол  $\alpha_\varepsilon$ , передняя поверхность – также усеченный конус, образующая которого составляет с торцом долбяка передний угол  $\gamma_\varepsilon$ .

Долбяки предназначены для нарезания прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых колес с наружным и внутренним зацеплением, шевронных колес, а также блоков зубчатых колес. 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.



а



б

Рис. 12. Процесс нарезания блока зубчатых колес (а) и вал-шестерни (б) на зубодолбежном станке с ЧПУ ОНА 16В CNC

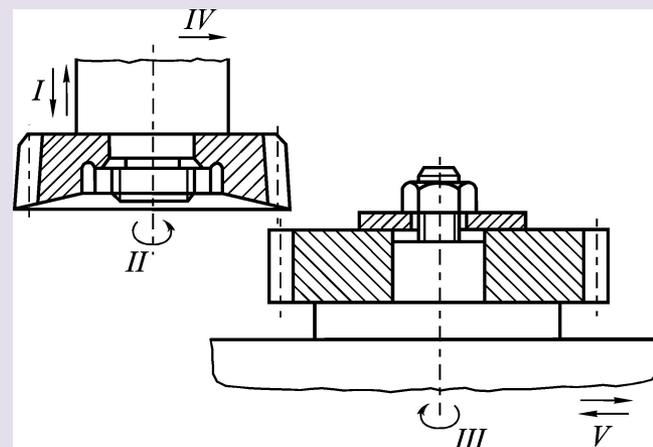


Рис. 13. Схема нарезания зубчатого колеса долбяком

На рис. 12 представлены процессы нарезания некоторых видов зубчатых колес на зубодолбежном станке с ЧПУ.

Нарезание зубчатых колес основано на имитации зацепления двух цилиндрических колес. При этом одно зубчатое колесо является режущим инструментом (долбяком), а второе (нарезаемое) – заготовкой. Долбяк закрепляется на штосселе (рис. 13) зубодолбежного станка и совершает возвратно-поступательное движение *I*. При нарезании прямозубых колес это движение является прямолинейным, а при нарезании косозубых – винтовым.

Главное движение или движения резания совершается при перемещении долбяка вниз, а холостой ход при движении его вверх. При этом следует поворот долбяка (движение II) относительно заготовки, т.е. выполняется обкаточное движение.

Скорость главного движения (скорость резания) определяется по формуле

$$v = \frac{2 \cdot l \cdot n}{1000},$$

где  $l$  – длина хода долбяка, которая равна длине зуба нарезаемого колеса, плюс величина недобега и перебега, составляющая 5...7 мм;  $n$  – число двойных ходов долбяка в минуту.

Скорость вращения долбяка задается величиной круговой подачи  $S_{\text{кр}}$ , определяющей толщину слоя материала, срезаемого боковыми режущими кромками, и выражаемой длиной дуги делительной окружности долбяка, на которую он поворачивается за один двойной ход (мм/дв.ход). Величина круговой подачи зависит от свойств обрабатываемого материала, модуля нарезаемого колеса, степени точности, шероховатости поверхности и т.д. Обычно она составляет 0,1...0,5 мм/дв.ход.

В процессе обработки заготовка, закрепленная на столе зубодолбежного станка, совершает непрерывное вращательное движение III строго согласованное с вращением долбяка, т.е. за время поворота долбяка на один зуб заготовка также поворачивается на один зуб.

Помимо указанных ранее движений зуборезный долбяк совершает движение радиальной подачи IV, обеспечивающее врезание долбяка в обрабатываемую заготовку. Для

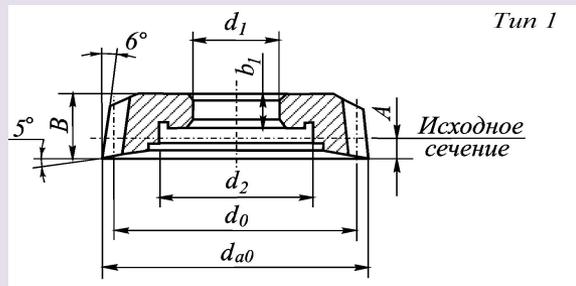
исключения трения задней поверхности зуба долбяка о заготовку при холостом ходе либо долбяк отводится от заготовки, либо стол станка от долбяка. При движении резания долбяк и стол занимают исходное состояние. На рис. 13 эти перемещения обозначены как движение V.

Процесс зубодолбления обеспечивает более высокую точность по сравнению с процессом зубофрезерования, вместе с тем существенно уступает ему по производительности, что обусловлено наличием холостого хода. Поэтому нарезание зубчатых колес методом зубодолбления целесообразно осуществлять в том случае, когда нельзя использовать процесс зубофрезерования, например, при нарезании блоков зубчатых колес, шевронных колес, а также зубчатых колес с внутренним зацеплением.

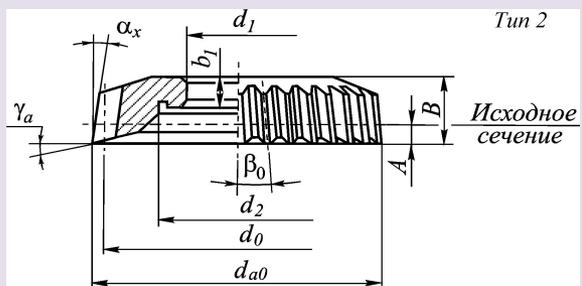
В машиностроении применяют различные типы зуборезных долбяков.

По способу крепления на штосселе станка долбяки делятся на насадные (рис. 14) и хвостовые (рис. 15). В свою очередь насадные долбяки по конструктивному исполнению подразделяются на дисковые (см. рис. 14, а, б) и чашечные (рис. 14, в).

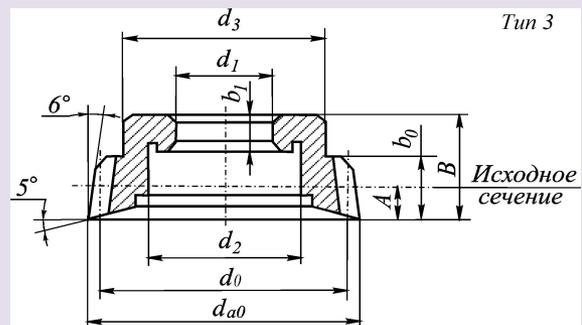
Насадные зуборезные долбяки используются преимущественно для нарезания прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых колес наружного зацепления. При этом следует отметить, что для нарезания косозубых и шевронных колес применяются косозубые долбяки. Отличительной особенностью дисковых долбяков от чашечных долбяков является то, что у чашечных долбяков, как видно из рис. 14, в, элементы крепления располагаются в специальной выемке. Наличие такой выемки



а

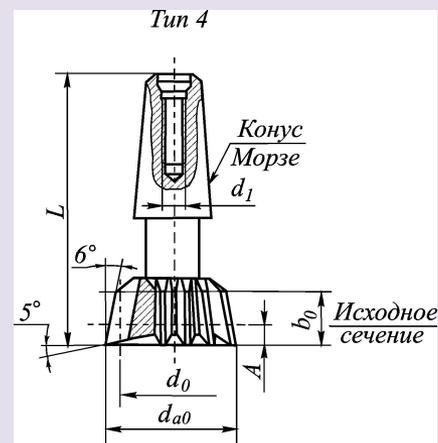


б

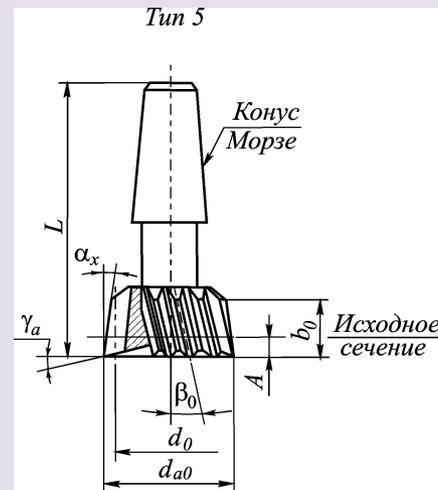


в

Рис. 14. Дисковые прямозубый (а) косозубый (б) и прямозубый чашечный (в) долбяки



а



б

Рис. 15. Хвостовые прямозубый (а) и косозубый (б) долбяки

исключает возможность их контакта с упором, имеющего место, например, при изготовлении блока зубчатых колес.

Хвостовые долбяки имеют небольшой диаметр и применяются в основном для нарезания колес с внутренним зацеплением и мелко модульных зубчатых колес ( $m < 1$ ).

В соответствии с ГОСТ 9323-79 долбяки изготавливают трех классов точности АА, А и В и пяти типов, из которых: тип I – дисковые прямозубые, тип II – дисковые косозубые, тип III – чашечные прямозубые, тип IV – хвостовые прямозубые и тип V – хвостовые косозубые. Долбяки класса точности АА применяются для изготовления зубчатых колес 6-й степени точности, а классов точности А и В – соответственно для 7-й и 8-й степеней точности.

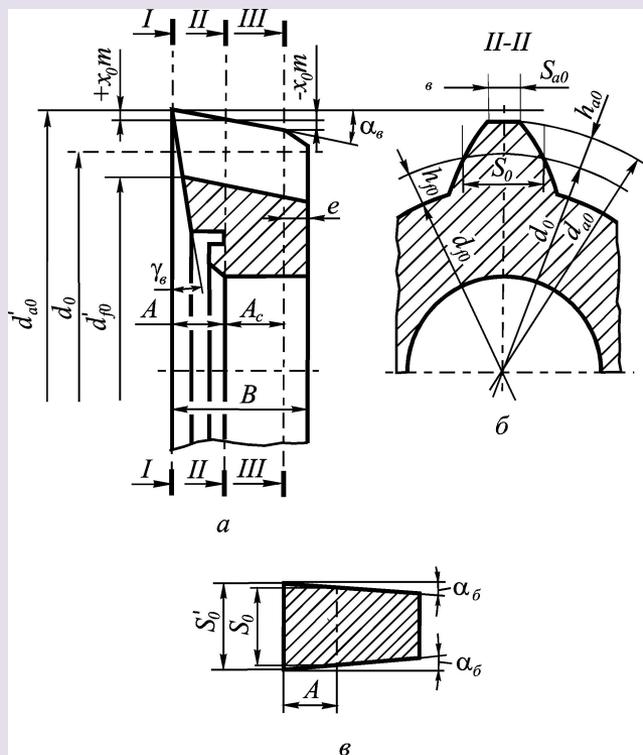


Рис. 16. Конструктивные элементы и геометрические параметры дискового прямозубого долбяка

Несмотря на некоторые конструктивные отличия, все указанные ранее типы долбяков имеют общие основные элементы. На рис. 16 представлены конструктивные элементы и геометрические параметры дискового прямозубого долбяка. Так как долбяк, как уже отмечалось, представляет собой скорректированное зубчатое колесо с непрерывно изменяемым смещением профиля инструментальной рейки по длине зуба, то его геометрия задается в трех характерных сечениях, расположенных перпендикулярно к оси долбяка.

В сечении I-I с максимально положительным смещением профиля, в сечении II-II с нулевым смещением профиля и в сечении III-III с максимально отрицательным смещением профиля, до которого возможна переточка долбяка, выполняемая по передней поверхности (рис. 16, а, б). Сечение II-II называется *исходным*, в котором все параметры являются расчётными, а расстояние от него до переднего торца – *исходным расстоянием нового долбяка*. Соответственно расстояние от сечения II-II до сечения III-III будет *исходным расстоянием окончательно сточенного долбяка*.

У стандартных долбяков, предназначенных для нарезания зубчатых колес с углом профиля  $\alpha_0 = 20^\circ$  величины переднего  $\gamma_\varepsilon$  и заднего  $\alpha_\varepsilon$  углов соответственно равны  $5^\circ$  и  $6^\circ$ .

Величина (см. рис 16, а) называется радиальным смещением профиля, а отношение величины  $x$  к модулю  $m$  называется коэффициентом смещения долбяка и обозначается как  $x_0 = \frac{x}{m}$ . С другой стороны, как видно из этого же рисунка,  $x = A \cdot \operatorname{tg} \alpha_\varepsilon$  откуда

$$A = \frac{x_0 m}{\operatorname{tg} \alpha_\varepsilon}; \quad A_c = \frac{|-x_0 m|}{\operatorname{tg} \alpha_\varepsilon}.$$

Следует отметить, что значения величин  $A$  и  $A_c$  могут быть как равны между собой, так и отличаться, причем иногда достаточно существенно, в зависимости от модуля и числа зубьев долбяка. Значения этих величин зависят также от числа зубьев нарезаемых колес и технологических условий изготовления долбяков.

Основными геометрическими параметрами долбяков, в частности для исходного сечения, являются: диаметр окружности выступов  $d_{a0}$ ; диаметр делительной окружности  $d_0 = m z_0$ , где  $m$  – модуль,  $z_0$  – число зубьев долбяка; диаметр окружности впадин  $d_{f0}$ ; высота головки зуба  $h_{a0} = 1,25m$ ; высота ножки  $h_{f0} = 1,25m$ ; толщина зуба по делительной  $S_0 = \pi m / 2 \operatorname{tg} \alpha_0$ ; толщина зуба по наружному диаметру  $S_{a0}$ .

От величины смещения 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.

Для сечения I-I, исходя из ранее изложенного, геометрические параметры рассчитываются по формулам:

- высота головки зуба

$$h'_{a0} = 1,25m + x_0 m;$$

- диаметр окружности выступов

$$d'_{a0} = d_0 + 2h'_{a0} = m z_0 + 2,5m + 2x_0 m;$$

- высота ножки зуб

$$h'_{f0} = 1,25m - x_0 m;$$

- диаметр окружности впадин

$$d'_{f0} = d_0 - 2h'_{f0} = m z_0 - 2,5m + 2x_0 m;$$

- полная высота зуба

$$h_0 = h'_{a0} + h'_{f0}.$$

В обозначении указанных параметров штрих указывает на то, что он относится к сечению I-I.

Аналогичным образом можно записать расчетные формулы и для сечения III-III. Однако в этом случае необходимо перед сомножителем сменить знак с положительного на отрицательный и ввести в обозначение параметров два штриха (

$$h''_{a0}, h''_{f0}, d''_{a0}, d''_{f0}$$

для боковых режущих кромок зуба долбяка задний угол  $\alpha_\varepsilon$  рассматривается в плоскости, касательной к делительному цилиндру (см. рис. 16, в) и рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_\varepsilon = \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \alpha_0,$$

где  $\alpha_0$  – угол зацепления.

Период стойкости  $T$  для долбяка выбирается в зависимости от значения модуля  $m$ . Для средних значений модуля  $m = 5 \dots 8$  мм период стойкости  $T = 240$  мин.

Закономерности, связывающие скорость резания  $v$  с основными параметрами резания ( $T$ ,  $S_0$ ,  $m$ ), выражаются структурной формулой

$$v = \frac{C_v}{T^m S_0^{y_v} m^{x_v}} K_v ,$$

$C_v$  - коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала;

$S_0$  - круговая подача;

$m$  - модуль;

$K_v$  - поправочный коэффициент на скорость, зависящий от условий обработки

## Износ модульных фрез и зуборезных долбяков

За критерий затупления для зуборезных фрез (дисковых и червячных) принимают износ по задней поверхности (рис. 17). Но необходимо иметь в виду, что износ по задней поверхности неравномерный, наибольшей величины он достигает у уголков зуба, поэтому эта величина и принимается за лимитирующий износ. Допустимый износ для чистовых зуборезных фрез не должен превышать величины  $h_3 = 0,2 \dots 0,4$  мм, для черновых  $h_3 = 0,8 \dots 1,2$  мм

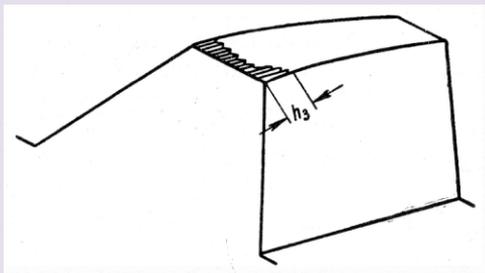


Рис. 17. Критерий затупления зуборезных фрез

За критерий затупления долбяка принимают износ по задней поверхности  $h_3$  и (рис. 18), величина износа  $h_3$  при чистовом зубодолблении не должна превышать  $0,2 \dots 0,4$  мм.

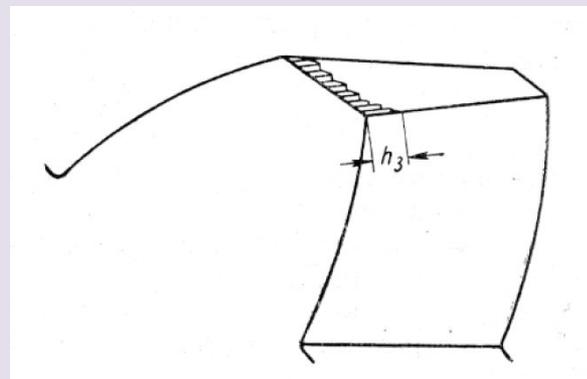


Рис. 18. Критерий затупления долбяка

## ЗУБОУДЕЛОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Для повышения степени точности и снижения величины шероховатости зубчатых колес, снижения шума в передаче используются различные зубоотделочные операции. Наибольшее распространение среди них получили *шевингование и шлифование*.

### ШЕВИНГОВАНИЕ

Шевингование – процесс отделки зубчатых колес средней твердости (обычно  $\leq 40HRC_3$ ) при помощи специального инструмента – шевера, срезающего с боковых поверхностей зуба тонкую стружку (5-15 мкм). При шевинговании обеспечиваются 6-7 степени точности зубчатых колес и шероховатость поверхности  $Ra = 0,63 \dots 0,16$  мкм.

Шеверы могут иметь различную конструкцию и бывают трех типов: червячные, реечные и дисковые.

**Червячные шеверы** (рис. 19) 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 червячным колесом. Стружки снимаются за счет проскальзывания витков червяка по боковым сторонам зубьев колеса.

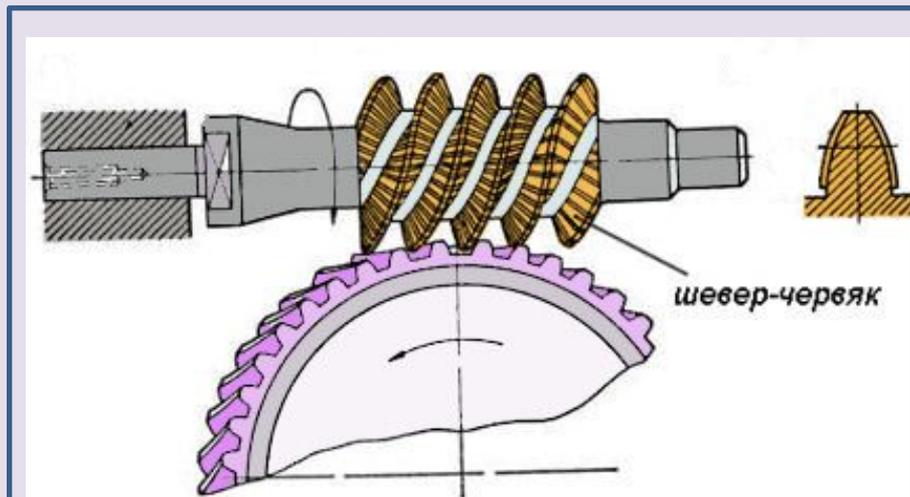


Рис. 19. Схема шевингования червячным шевером

**Реечные шеверы** (рис. 20, а) 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 (рис. 20, б) применяют косозубые рейки, а для косозубых колес - прямозубые рейки. На боковых сторонах зубьев рейки наносят прямоугольные канавки, нормальные к направлению зубьев.

Следует отметить, что изготовление зубьев шевера-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.

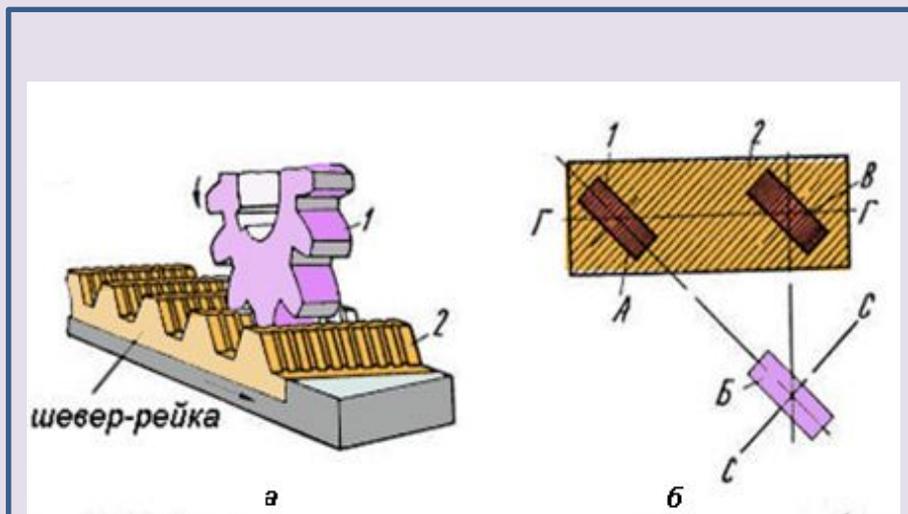


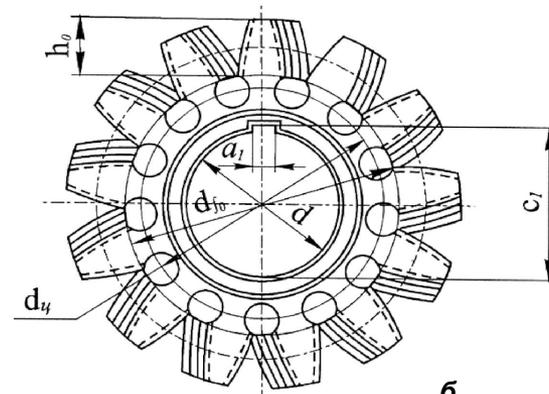
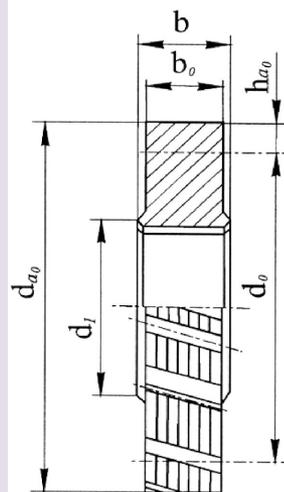
Рис. 20. Реечный шевер (а) и схема шевингования реечным шевером (б)

**Дисковый шевер** (рис. 21) представляет собой прямозубое или косозубое зубчатое колесо, изготовленное из инструментальных материалов с высокой степенью точности. На боковых сторонах его зубьев, как и у других типов шеверов, параллельно торцам или перпендикулярно направлению линии зуба 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 мелкозубых колес ( $m = 0,2 \dots 0,9$  мм), у которых они перерезают зуб насквозь из-за малых размеров зубьев.

Основными конструктивными параметрами дисковых шеверов являются: диаметр окружности вершин зубьев (наружный диаметр)  $d_{a0}$  делительный диаметр  $d_0$  диаметр окружности впадин  $d_{f0}$ ; диаметр посадочного отверстия  $d$ ; нормальный модуль  $m_n$  число зубьев  $z_0$ ; ширина шевера по венцу  $b_0$ ; угол  $\beta_0$  аклона винтовой линии зуба ( $\beta_0$ ;  $5\beta_0 = \circ$ ).



а



б

Рис. 21. Общий вид (а) и конструктивные параметры дискового шевера (б)

При шевинговании уменьшаются погрешности профиля, основного шага, волнистость боковой поверхности зубьев (циклическая погрешность), увеличивается пятно контакта по высоте зуба и др.

Основные факторы, влияющие на точность шевингования: точность шевера и станка, точность и жесткость установки шевера и обрабатываемого колеса, точность предварительно нарезанного колеса и его базовых поверхностей.

При шевинговании отсутствует жесткая кинематическая связь между шевером и заготовкой, поэтому этот процесс не исправляет или незначительно исправляет накопленную погрешность окружного шага, разность окружных шагов, направление линии зуба. В процессе шевингования зубья шевера и обрабатываемого колеса сцеплены между собой. Одному из элементов этого зацепления сообщается принудительное вращение. Кроме того, шеверу или колесу сообщается два поступательных движения: одно возвратно-поступательное вдоль оси, другое – периодическое – перпендикулярно оси. Шевер и колесо установлены на станке под углом скрещивания  $\varphi$  друг к другу, поэтому между зубьями шевера и колеса при их вращении происходит осевое скольжение.

Зубья шевера закалены до высокой твердости (63...66 HRC<sub>3</sub>) и имеют на боковых поверхностях канавки, которые образуют режущие кромки.

Принцип шевингования состоит в следующем. Если цилиндрическое зубчатое колесо с прямыми зубьями перекачивать по рейке с косыми зубьями параллельно торцу рейки, то оно кроме вращательного движения получает еще и поступательное перемещение вдоль своей оси. Если зубчатое колесо удерживать от осевого перемещения, то при перекачивании колеса по неподвижной рейке между зубьями возникает усиленное скольжение. Скорость этого скольжения и есть скорость резания при шевинговании. На рис. 22, а показана схема работы шевера. Если точка А на поверхности шевера при его повороте переместится в положение А<sub>2</sub>, то точка А, лежащая на поверхности колеса, перейдет в точку А<sub>1</sub>, следовательно, произойдет как бы относительное скольжение зуба шевера вдоль зуба колеса. В результате скольжения острые кромки закаленного до высокой твердости шевера срезают (соскабливают) с боковых поверхностей зуба колеса тонкие волосообразные стружки.

Если представить в векторной форме скорости перемещений контактирующих точек шевера и колеса, обозначив их соответственно  $\vec{v}_0$  и  $\vec{v}_1$ , то из плана скоростей (рис. 22, б) можно видеть, что относительное скольжение зубьев шевера и колеса  $\vec{v}$  разделяется разностью векторов  $\vec{v}_0$  и  $\vec{v}_1$ , то есть вектором  $\vec{v}$ , который и определяет скорость резания при шевинговании. Тогда при шевинговании цилиндрических колес  $\vec{v}_0$  и  $\vec{v}_1$  скорость резания составляет:

- для прямозубых колес  $v = v_0 \sin \varphi$  ;

- для косозубых колес  $v = v_0 \frac{\sin \varphi}{\cos \beta_1}$  ,

где  $\varphi$  – угол скрещивания осей шевера и колеса;  
 $\beta_1$  – угол наклона зубьев колеса;  $v_0$  - окружная скорость шевера, определяемая по формуле

$$v_0 = \frac{\pi d_0 n_0}{1000} ,$$

где  $d_0$  – диаметр делительной окружности шевера;  
 $n_0$  – число оборотов шевера.

Существуют четыре кинематические схемы шевингования, представленные на рисунке 23.

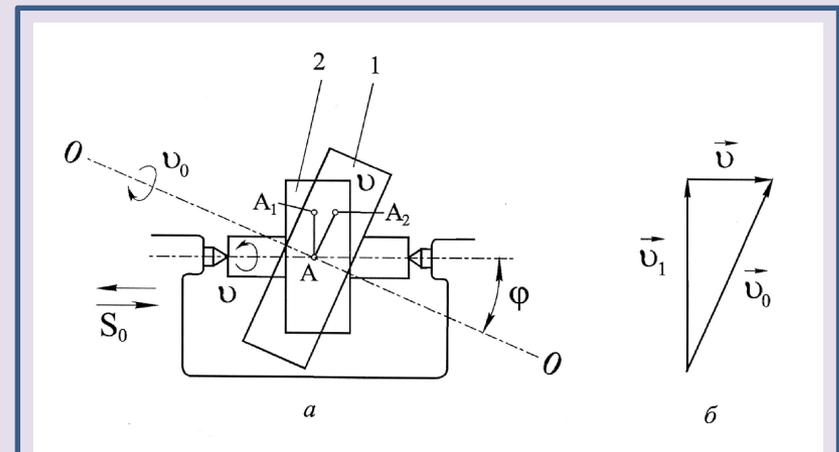


Рис. 22. Схема работы дискового шевера (а) и план скоростей при обработке шевером цилиндрических прямозубых колес (б): 1 – шевер; 2 – колесо зубчатое

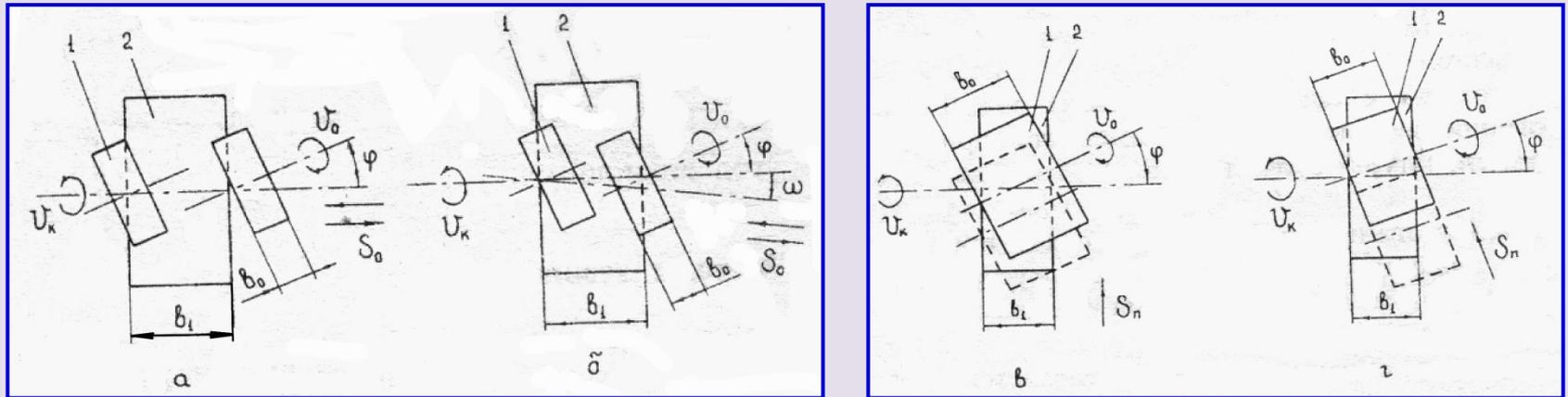


Рис. 23. Схема шевингования:

а – с продольной подачей; б – с диагональной подачей; в – с тангенциальной подачей; г – методом «короткого хода»; 1 шевер; 2 - колесо

**Шевингование с продольной (осевой) подачей.** Среди известных кинематических схем шевингования дисковыми шеверами чаще всего применяется шевингование с (осевой) продольной подачей (см. рис. 23, а). Этот метод шевингования наиболее широко применяется при обработке широкой номенклатуры зубчатых колес, изготавливаемых малыми партиями.

При шевинговании направление подачи происходит параллельно оси обрабатываемого колеса. Ось шевера, установленного на шпинделе станка, поворачивают на угол скрещивания  $\varphi$  к оси зубчатого колеса.

Величина угла скрещивания  $\varphi$  определяется по формуле

$$\varphi = \beta_1 \pm \beta_0 ,$$

где  $\beta_1$  - угол наклона зуба шевингуемого колеса;  $\beta_0$  - угол наклона линии зуба шевера.

Знак «плюс» ставят при совпадающих, а «минус» - при противоположных направлениях винтовых линий зубьев колеса и шевера.

Стол станка с обрабатываемым колесом совершает возвратно-поступательное движение. В конце каждого продольного хода стола осуществляется радиальная подача стола на  $S_p = 0,02-0,06$  мм/ход с одновременным изменением направления вращения шевера. Сближение шевера и колеса после каждого прохода продолжается до того момента, когда толщина обрабатываемого зуба не достигнет заданного размера. Операция шевингования заканчивается несколькими калибрующими ходами без радиальной подачи стола.

**Шевингование с диагональной подачей.** Этот метод шевингования производится на станках, допускающих возможность поворота центровых бабок относительно направляющих шевинговальной бабки на угол  $\omega$  в плоскости, параллельной осям шевера и колеса (рис. 23, б). При этом методе шевингования продольная подача осуществляется под некоторым углом к оси колеса. Направление и угол наклона  $\omega$  продольной подачи к оси колеса устанавливаются таким образом, чтобы у каждого из торцов зубчатого венца колеса профилирующая точка на зубьях шевера находилась в зоне первой канавки от торца. Так как ось колеса к направлению подачи находится под углом  $\omega$ , то точка контакта шевера с колесом перемещается не только по длине зуба колеса, как это имеет место при шевинговании с продольной подачей, но и по длине зуба шевера. Поэтому каждое сечение шевера является калибрующим и при ходе стола для обработки всей длины зуба достаточно выхода торца шевера за торец обрабатываемого колеса.

Благодаря непрерывному изменению положения точек контакта на зубьях шевера износ их более равномерен, в результате чего шевер меньше изнашивается. При шевинговании с диагональной подачей сокращается длина продольного хода шевера, что уменьшает машинное время обработки, особенно при шевинговании относительно узких колес. Преимуществом этого метода шевингования является также возможность уменьшения ширины канавки для выхода шевера при обработке колес с закрытыми венцами.

Этот метод шевингования также получил достаточно широкое распространение

**Шевингование с тангенциальной (поперечной) подачей.** Схема шевингования представлена на рис. 23, в. Шевингование ведется при перемещении шевера (или стола с обрабатываемым колесом) в направлении, перпендикулярном оси колеса (ось шевера перемещается в плоскости, параллельной оси колеса) с поперечной подачей  $S_n$ .

При тангенциальном шевинговании ширина шевера должна быть больше ширины обрабатываемого колеса. Вследствие непрерывного смещения режущих точек по длине зубьев шевера их износ протекает медленно и равномерно, и, следовательно, повышается стойкость шевера.

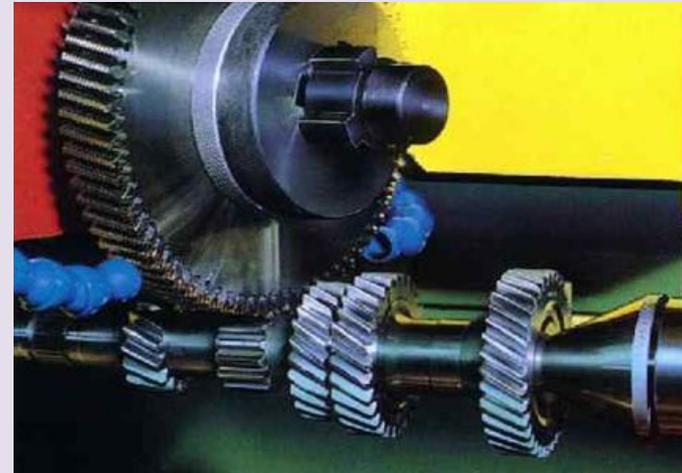
Так как при тангенциальном шевинговании отсутствуют калибрующие проходы шевера и происходит значительное изменение расположения осей шевера и колеса в процессе поперечного хода, то точность и шероховатость обрабатываемой поверхности зубьев колеса несколько грубее в сравнении с диагональным шевингованием.

**Шевингование методом «короткого хода».** Схема шевингования представлена на рис. 23, г. Метод аналогичен тангенциальному шевингованию, но подача здесь осуществляется в направлении, перпендикулярном оси шевера.

Изображения шевингования зубчатых колес приведены на рис. 24.



а



б

Рис. 24. Процессы шевингования:  
а – косозубого зубчатого колеса; б – много шестеренчатого вала

## ЗУБОШЛИФОВАНИЕ

Зубошлифование относится к отделочным операциям обработки зубчатых колес, в процессе которого может обеспечена 4...7-я степени точности. Преимуществом зубошлифования по сравнению с другими видами обработки является то, что этот метод позволяет обрабатывать зубчатые колеса любой твердости. При этом шлифование может производиться как методом копирования, так и обкатки.

*При шлифовании по методу копирования* рабочий профиль шлифовального круга является точной копией профиля впадины между зубьями. В настоящее время *метод копирования или метод профильного зубошлифования* получил динамичное развитие и постепенно вытесняет из технологии производства зубчатых колес метод обкаточного шлифования.

Схема профильного зубошлифования приведена на рис. 25. Как видно из данной схемы, абразивному кругу сообщается вращательное движение со скоростью  $v$  вокруг своей оси и возвратно-поступательное с подачей  $S_{пр}$

вдоль образующей зуба, а радиальная подача  $S_p$  производится периодически на каждый двойной ход. После шлифования впадины производится поворот зубчатого колеса на  $1/z$  часть окружности (где  $z$  – число зубьев обрабатываемого колеса) и выполняется обработка следующей впадины. При этом могут шлифоваться только профили или полностью впадина зубьев, включая переходную кривую и дно. Одним из достоинств этого метода является возможность шлифования зубьев со сложным контуром впадин, венцов внутреннего зацепления, закрытых буртиками венцов наружного зацепления. При шлифовании прямозубых колес круг просто перемещается вдоль оси колеса, а при обработке косозубых – осевое перемещение круга синхронно связано с поворотом заготовки вокруг оси для образования линии наклона зубьев.

На рис. 26. приведена схема расположения осей и направление движения круга и заготовки для обеспечения процесса профильного зубошлифования при горизонтальном расположении оси заготовки. Движение  $A$  вокруг оси  $X$  обеспечивает поворот (деление) при переходе обработки от зуба к зубу. Вдоль оси  $Y$  осуществляется радиальная подача на врезание и обеспечивается размер зуба по толщине. Движение  $B$  вокруг оси  $Y$  необходимо для разворота круга при обработке косозубых колес. Оси  $V$  и  $W$  требуются для двухкоординатного механизма правки шлифовального круга.

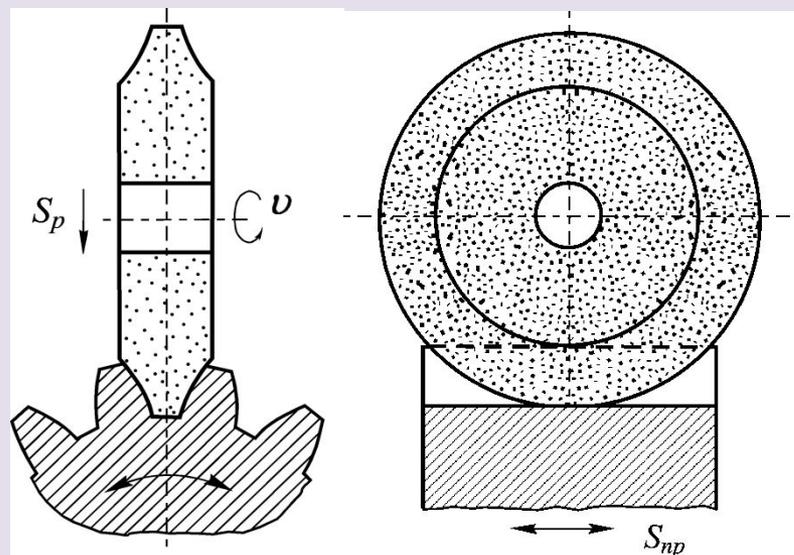


Рис. 25. Схема профильного зубошлифования [3]

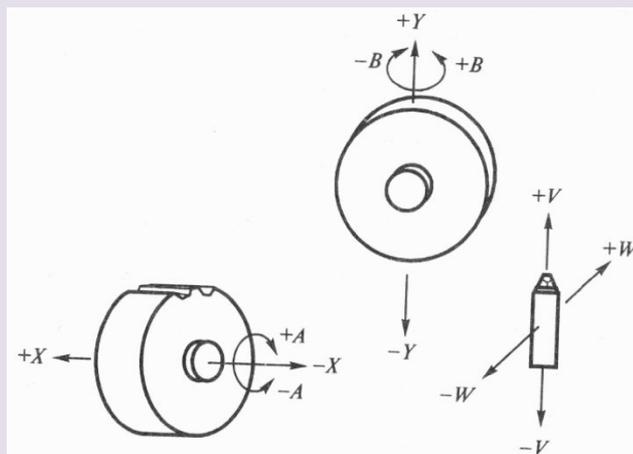


Рис. 26. Схема расположения осей при профильном зубошлифовании [3]

На рис. 26 приведены процессы профильного зубошлифования прямозубой и косозубой шестерен на станке с ЧПУ SMG 405 Stanexin.

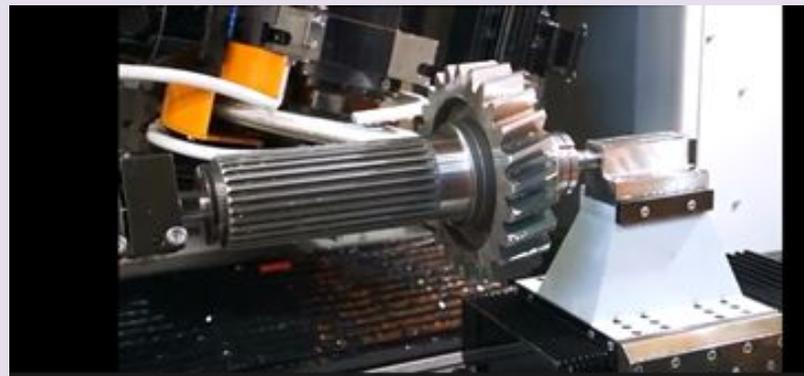


Рис. 26. Процессы обработки прямозубой и косозубой шестерен на станке SMG 405 Stanexim

**Выделим главные особенности метода профильного зубошлифования, отличающие его от метода обкатки [3].**

1. Простая кинематика процесса, реализуемая в жесткой конструкции станков. Высокий уровень автоматизации процесса обработки. Возможность осуществлять высокоскоростную силовую обработку, включая глубинное шлифование из целой заготовки.

2. Высокая производительность обработки. Из-за большой площади поверхности контакта круга с обрабатываемой поверхностью в единицу машинного времени удаляется больший объем металла. Процесс требует больших усилий резания, а следовательно, и большой мощности привода шлифовального круга.

3. Геометрия шлифовального круга жестко привязана к геометрии обрабатываемой детали.

4. Возможность использования непрявящихся шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов (алмаз, кубический нитрид бора).

5. Возможность обработки зубчатых колес с неэвольвентным профилем, например, с зацеплением М.Л. Новикова.

6. Возможность обработки зубчатых колес внутреннего зацепления, в том числе и малых диаметров (30... 40 мм).

7. Возможность обработки зубчатых колес с закрытыми венцами, ограничивающими свободный выход шлифовального круга из зоны обработки.

8. Возможность получения правящимися шлифовальными кругами из электрокорунда 6-7 степени точности зубчатых колес.

Развитию процесса профильного шлифования способствовало создание фирмой KAPP процесса зубошлифования на базе использования направляющихся шлифовальных кругов. Корпус круга выполняется из термостойкой подшипниковой стали, рабочие поверхности которого покрываются в один слой зернами кубического нитрида бора (CBN). В качестве связки используется гальванический никель. Погрешность рабочих профилей круга после покрытия не превышает 2...3 мкм, что позволяет обрабатывать зубчатые колеса особо высокой точности. Важно отметить, что высокая точность кругов достигается за счет точного отсева зерен кубического нитрида бора и уникальной технологии их закрепления, поэтому шлифовальные круги производства фирмы KAPP после покрытия не шлифуют, как это делают другие фирмы-производители аналогичных кругов. По этой причине круги фирмы KAPP обладают очень высокой режущей способностью.

Стойкость кругов из кубического нитрида бора по данным фирмы KAPP в 3000...4000 раз выше, чем кругов из электрокорунда. Шлифование такими кругами практически не приводит к возникновению шлифовочных прижогов, так как выделяемая теплота поглощается стружкой. Теплопроводность кубического нитрида бора в 46 раз выше, чем электрокорунда. При такой работе кругами с однослойным покрытием только 4% теплоты уходит в деталь, а при шлифовании кругами из электрокорунда – 63%. Столь высокая теплопроводность приводит к тому, что температура в зоне резания не превышает 500...550 °С, в то время как при шлифовании электрокорундом – 800...850 °С. При этом остаточные напряжения растяжения на поверхности зубьев, наводимые в процессе зубошлифования кубическим нитридом бора, существенно ниже, чем при шлифовании электрокорундом.

Другим достоинством профильного шлифования указанными кругами является его высокая стойкость. Один круг при правильной его эксплуатации позволяет обрабатывать до 1000 деталей. По истечении установленного срока службы покрытие может регенерироваться.

Причем эта операция может повторяться до 20 раз и более.

Несмотря на все преимущества профильного зубошлифования направляющимися кругами, следует признать этот процесс дорогостоящим.

Правка кругов алмазным роликом осуществляется с помощью двухкоординатных механизмов правки, системы управления которыми интегрированы в системы ЧПУ станка. Схема правки круга приведена на рис. 27.

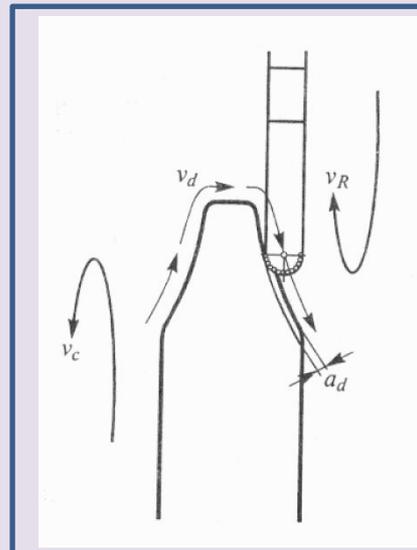


Рис. 27. Схема правки профильного шлифовального круга

Станки для шлифования зубчатых колес профильными кругами выпускаются многими западными фирмами, такими, как KAPP, GLEASON-PFAUTER-HURTH, NILES и др.

**Метод обкатного зубошлифования** реализуется в различных схемах, отличающихся кинематикой процессов обката и деления, а также формой используемых шлифовальных кругов. Различают три схемы обкатного зубошлифования:

- **шлифование тарельчатыми кругами с единичным делением;**
- **шлифование коническим кругом с единичным делением;**
- **шлифование червячным кругом с непрерывным делением.**

При шлифовании зубчатого колеса по методу обкатки абразивный круг (или круги) копирует профиль зубчатой рейки и обкатывается с колесом, повторяя обкатывание зубчатой рейки с колесом.

Схема шлифования зубьев **тарельчатыми кругами** с единичным делением относится к старейшим схемам и до настоящего времени широко используется в производстве авиационных зубчатых колес. Кинематика зубошлифования проста и соответствует теоретически точному воспроизведению эвольвентного профиля зубьев.

Два тарельчатых шлифовальных круга могут быть установлены с наклоном к вертикальной плоскости под углом  $\alpha_{ш} = 15$  и  $20^\circ$  (15- и 20-градусный способ шлифования) или параллельно друг другу с  $\alpha_{ш} = 0^\circ$ . Схема установки кругов показана на рис. 28.

В процессе шлифования круги получают вращательное I и возвратно-поступательное (вдоль линии зуба) движения, а обрабатываемое зубчатое колесо вращается (качается) вокруг своей оси (движение II) и одновременно перемещается прямолинейно (движение III) (рис. 29). Число качаний  $n$  зубчатого колеса определяет скорость обкатки. При этом поступательное движение зубчатого колеса согласовано с его вращением так, что оно как бы катится по воображаемой рейке. При обкаточном движении стола зубошлифовального станка в одном направлении обрабатывается одна боковая поверхность зуба, а при его движении в противоположном направлении шлифуется вторая боковая поверхность зуба. Движение колеса вдоль своей оси осуществляется медленно.

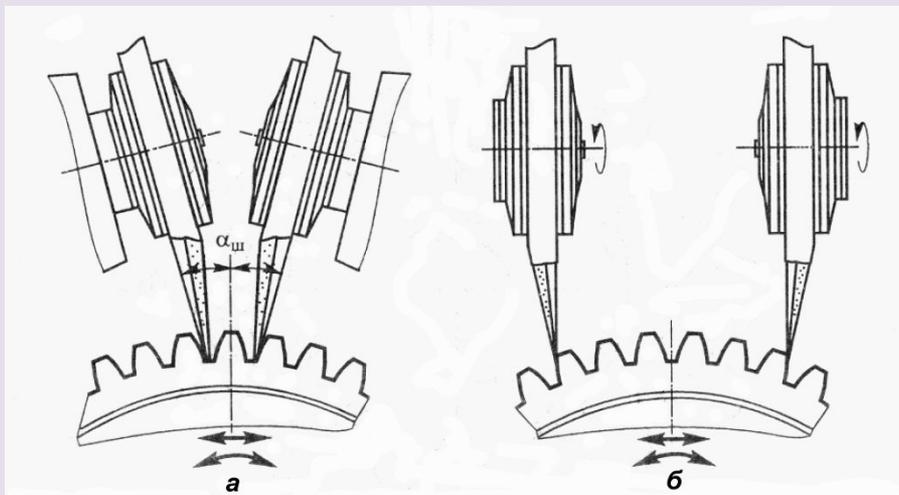


Рис. 28. Схема установки тарельчатых шлифовальных кругов при обработке зубчатых колес:

- а -  $\alpha_{ш} = 15$  и  $20^\circ$  (15- и 20- градусный способ шлифования);
- б -  $\alpha_{ш} = 0^\circ$  (нулевой способ шлифования)

Глубина резания задается смещением кругов. Скорость это движения определяет осевую подачу  $S$ . После обработки одной впадины колесо поворачивается на один зуб, т.е. осуществляется делительное движение.

Несмотря на одинаковое движение обкатки, разная установка кругов при 15-градусном и нулевом способах шлифования приводят к различным схемам образования резов на поверхностях зубьев. Следы резов представляют собой характерную сетку при 15-градусном способе (рис. 30, а) и серию параллельных штрихов при нулевом способе (рис. 30, б).

При нулевом способе шлифования выше производительность и качество обработки. Для него характерны более короткий ход обкатки, сокращенная длина продольного хода шлифуемого колеса, а также меньшая шероховатость поверхности ( $Ra = 0,25 \dots 0,63$  мкм) из-за отсутствия характерной сетки.

Основным преимуществом данной схемы шлифования зубьев является высокая точность шлифования профиля (4-5 степень точности). Так как при данной схеме профилирования площадка контакта режущей кромки круга с обрабатываемой поверхностью весьма мала, то форма шлифовального круга практически не оказывает влияния на погрешность профиля зуба. Высокая точность обработки также обусловлена наличием специального компенсационного механизма, контролирующего неизбежный в процессе шлифования износ абразивных кругов и автоматически перемещающих их в исходное положение.

Другой важной особенностью данной схемы зубошлифования, имеющей определяющее значение при шлифовании зубчатых колес, применяемых в авиационном двигателестроении, является низкая теплонапряженность процесса и, как следствие, меньшая склонность (по сравнению с другими схемами) к появлению шлифовочных дефектов в виде шлифовочных прижогов и микротрещин [3].

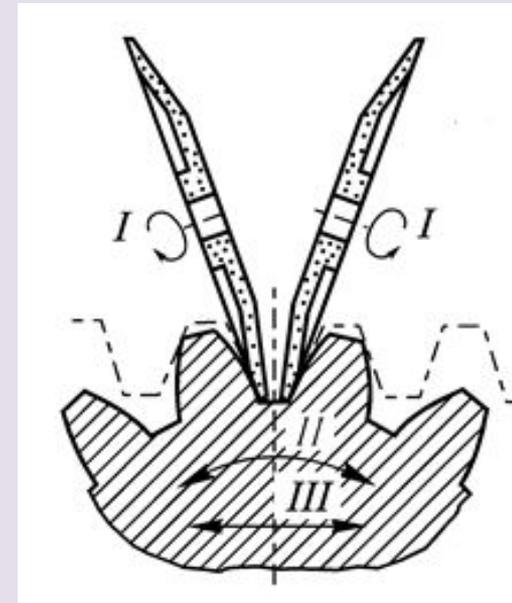


Рис. 29. Движения, необходимые при шлифовании тарельчатыми кругами.

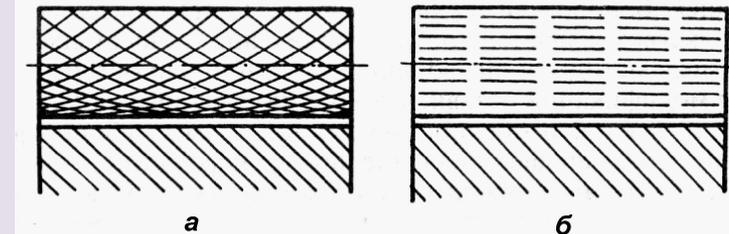


Рис. 30. Следы резов от шлифовальных кругов на боковых поверхностях зубьев [3]: а – при 15-градусном шлифовании; б – при нулевом способе шлифования шлифования

Этому способствуют два обстоятельства. Во-первых, шлифование зубьев можно производить пористыми и сравнительно мягкими абразивными кругами, так как износ кругов не оказывает существенного влияния на погрешность профиля зубьев благодаря тому, что площадка контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью весьма мала и быстро перемещается. Во-вторых, на поверхность зубьев переносится малое количество теплоты, не приводящее к структурным изменениям в поверхностном слое детали.

К недостаткам данной схемы шлифования в первую очередь следует отнести ее малую производительность. Другим недостатком является малая универсальность, поскольку требуются для каждого типоразмера обрабатываемых зубчатых колес специальные делительные диски и обкатные барабаны.

На авиадвигателестроительных заводах России до настоящего времени широко используются станки, работающие по данной схеме зубошлифования. В первую очередь это станки фирмы MAAG моделей HSS-30, SD-32X и SD-36X. Указанные станки отличает высокая точность обработки и низкая шероховатость поверхности зубьев. Отечественными станками, аналогичными по конструкции HSS-30, являются станки модели 5851 (рис. 31), ранее выпускаемые, Московским заводом шлифовальных станков.



Рис. 31. Зубошлифовальный станок модели 5851

Схема шлифования цилиндрических зубчатых колес **коническим кругом** относится к методу обкатки с периодическим делением. При данной схеме шлифования круг имеет форму однозубой рейки. Кинематика данного процесса показана на рис. 32).

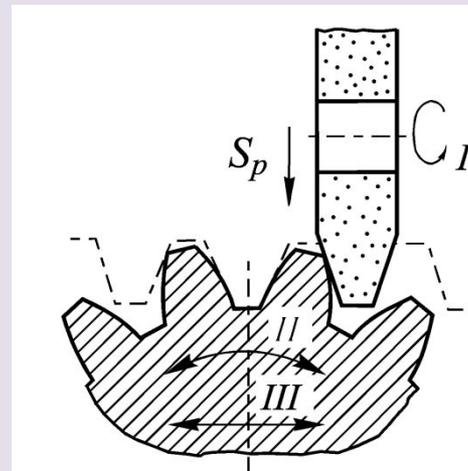


Рис. 32. Движения, необходимые при шлифовании кругом с коническим профилем.

При шлифовании зубчатых колес коническим кругом существует два способа шлифования – раздельное и одновременное. При раздельном шлифовании круг в первой половине обкаточного движения шлифует только одну сторону профиля зуба, а во второй половине – другую. Затем происходит деление на зуб.

При одновременном шлифовании круг обрабатывает обе стороны профиля во время обката в одну сторону, после чего происходит деление на следующий зуб и во время обката в другую сторону шлифуются обе стороны профиля второго зуба.

В процессе шлифования обрабатываемое колесо совершает движение обкатки, состоящее из двух синхронно связанных движений: поворота вокруг своей оси и поступательного перемещения относительно производящей рейки, зубом которой является шлифовальный круг. При этом круг совершает возвратно-поступательное движение вдоль линии зуба. Скорость этого перемещения характеризует продольную подачу  $S_{np}$ . Поперечная подача определяется углом поворота зубчатого колеса за один двойной ход каретки шлифовального круга.

При шлифовании зубьев косозубого колеса салазки направляющих шлифовального круга разворачиваются на соответствующий угол наклона зубьев. Правка круга по рабочим поверхностям производится много кристаллическими алмазами, закрепленными в стальных державках.

При данном методе шлифования возможно получение зубчатых колес 5-6 степеней точности.

Эта схема шлифования реализована в конструкциях станков фирмы NILES. Эта фирма производит станки серии ZT, обеспечивающие обработку цилиндрических зубчатых колес с прямыми и косыми зубьями наружного зацепления в диапазоне диаметров 30...4000 мм. Другой известной фирмой, выпускающей станки, работающие по данной схеме зубошлифования, является фирма HOFER. Серия станков NOVA, охватывающая диапазон диаметров обрабатываемых зубчатых колес 30...1000 мм, отличается высокоразвитыми системами ЧПУ. Однако следует отметить, что станки, работающие по данной схеме, не нашли применения в серийном производстве зубчатых колес ГТД [3].

Наиболее востребованным при производстве зубчатых колес ГТД в настоящее время является процесс зубошлифования **червячными абразивными кругами** по схеме обкатки с непрерывным делением. Кинематика процесса приведена на рис. 33 и практически не отличается от схемы зубофрезерования червячными фрезами.

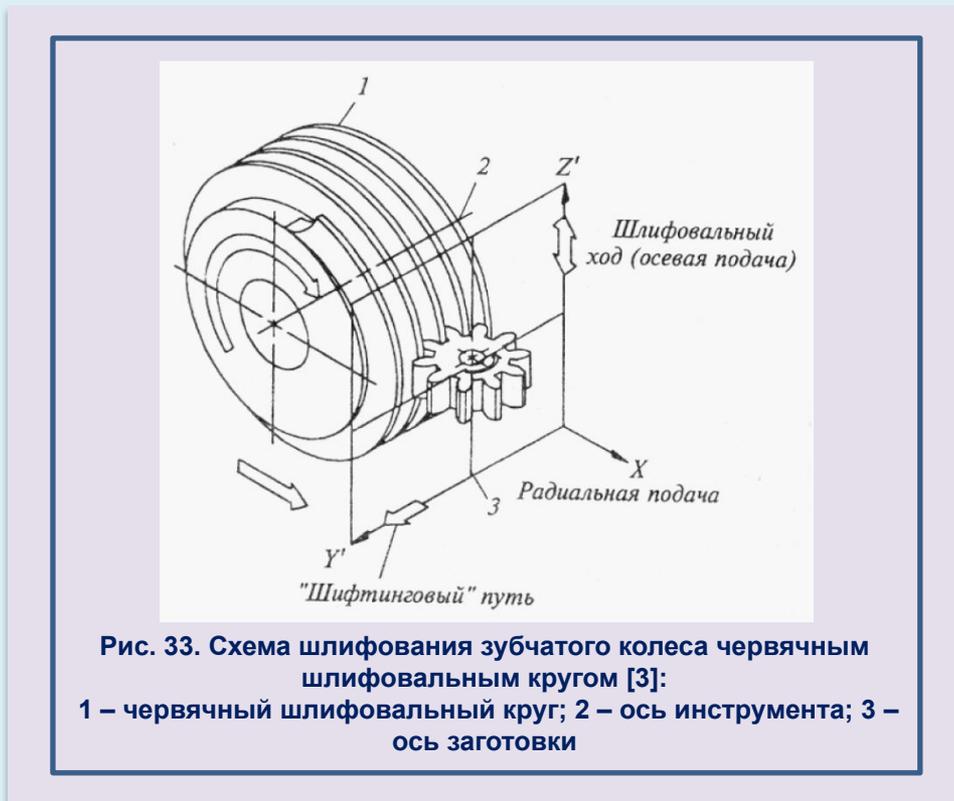


Рис. 33. Схема шлифования зубчатого колеса червячным шлифовальным кругом [3]:  
1 – червячный шлифовальный круг; 2 – ось инструмента; 3 – ось заготовки

Основным движением станка, определяющим точность обработки деталей, является согласованное движение (вращение) шлифовального круга и обрабатываемого колеса. В современных станках это движение обеспечивается электронной коробкой обката, что позволяет получать зубчатые колеса высокой точности по кинематическим показателем (5-6 степени точности).

Во время цикла шлифования круг перемещается в радиальном направлении (радиальная подача) после прохождения верхней и нижней крайних точек. Этот стандартный процесс маятникового шлифования повторяется до тех пор, пока сохраняются режущие свойства и точность профиля инструмента. Период стойкости инструмента определяется эмпирическим путем. По достижении этого периода производится тангенциальный сдвиг, позволяющий ввести в работу новый виток червячного шлифовального круга. При обработке высокоточных зубчатых колес этим методом пользуются на последних чистовых проходах шлифования.

Прерывание процесса шлифования, связанное с тангенциальным смещением круга, называемое по аналогии с зубофрезерованием «шифтингом», снижает производительность обработки. Поэтому в конструкциях современных станков предусмотрено автоматическое выполнение этого движения в цикле шлифования. В процессе чернового шлифования за счет постоянного участия в работе новых неизношенных витков круга весь припуск может быть снят за 2—3 прохода. Дополнительный сдвиг круга на новый виток при чистовом шлифовании позволяет обеспечить стабильную высокую точность. Производительность шифтингового шлифования, по сравнению с маятниковым, может быть повышена в 2—3 раза.

В качестве инструмента используются либо круги из электрокорунда, либо эльборовые круги на керамической связке. Предварительное профилирование круга целесообразно выполнять вне шлифовального станка, например, на токарно-винторезном станке, оснащённом механизмом профилирования, если круги поставляются без предварительно прорезанной винтовой канавки.

Балансировка червячных шлифовальных кругов является важнейшей операцией, определяющей конечное качество шлифования. Как правило предварительная динамическая балансировка осуществляется на специальных машинах. Следует отметить, что современные зубошлифовальные станки оснащаются специальными устройствами для автоматической подбалансировки шлифовального круга, что позволяет повысить точность шлифования и снизить трудоемкость процесса.

Мировым лидером в производстве зубошлифовальных станков, работающих по схеме непрерывного обката червячными шлифовальными кругами, является фирма REISHAUER, создавшая ряд моделей, такие как: RZ300E, RZ301S, RZS, RZ362A, оснащенных современными системами ЧПУ.

Основными функциями, осуществляемыми ЧПУ являются:

- автоматизация процесса правки шлифовального круга;
- управление шифтинговым перемещением шлифовального круга;
- автоматическое центрирование детали и шлифовального круга;
- автоматическая динамическая подбалансировка шлифовального круга;
- программное обеспечение выполнения модификации по линиям зубьев;
- контроль функционирования систем станка (диагностика).

Получил распространение также станок TAG 400 CNC, являющийся совместной разработкой фирм GLEASON и OKAMOTO. По своим техническим характеристикам указанный станок близок к ранее рассмотренным, но по уровню автоматизации и технологическим возможностям превосходит их.

Станок оснащен воськоординатной системой ЧПУ, обеспечивающей:

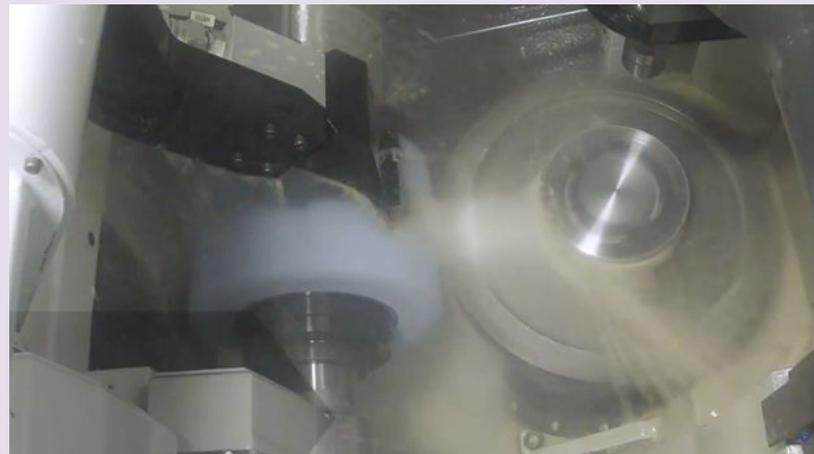
- полную автоматизацию цикла шлифования и правки круга, включая шифтинговое перемещение;
- автоматическое деление припуска;
- автоматическую динамическую балансировку шлифовального круга;
- управление модификацией профиля и линий зубьев;
- автоматическое управление системой подачи СОЖ.

Данный станок оснащен двухкоординатной системой правки, интегрированной в систему ЧПУ станка, что позволило не только полностью автоматизировать цикл шлифования, но и ввести принципиально новый для данной схемы шлифования вид правки – контурную правку.

Процессы правки червячного круга и шлифования зубьев приведены на рис. 34.



а



б

Рис. 34. Процессы правки червячного круга (а) и шлифования зубьев зубчатого колеса (б)

# КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ

## ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Под качеством поверхности детали следует понимать точность изготовления её геометрических параметров и совокупность физико-химических характеристик поверхностного слоя

### Геометрические параметры:

- линейные и угловые размеры;
- отклонения формы;
- волнистость поверхности;
- шероховатость поверхности.

### Физико-химических характеристики поверхностного слоя:

- микротвердость поверхности;
- остаточные напряжения;
- структурное и фазовое состояние.

### Геометрические параметры

Допуски на линейные размеры устанавливают ГОСТ 25346-89 и ГОСТ 25347-82, а на угловые размеры и конические соединения ГОСТ 8908-81, ГОСТ 25307-82, ГОСТ 25548-82

### Отклонения формы (ГОСТ 25642-81)

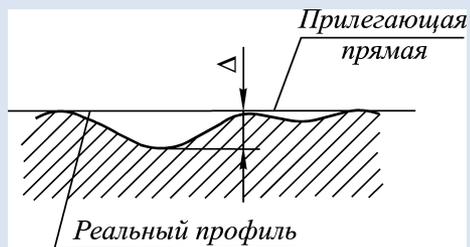


Рис. 35. Отклонение от прямолинейности в плоскости

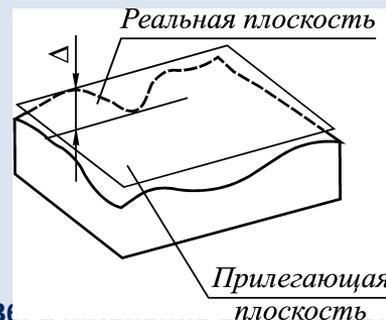
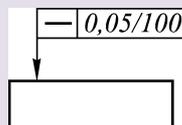
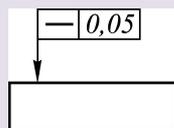
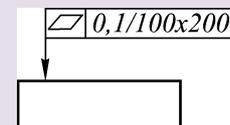
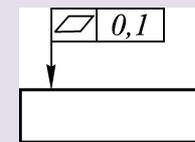


Рис. 36. Отклонение от плоскостности



## Отклонения формы

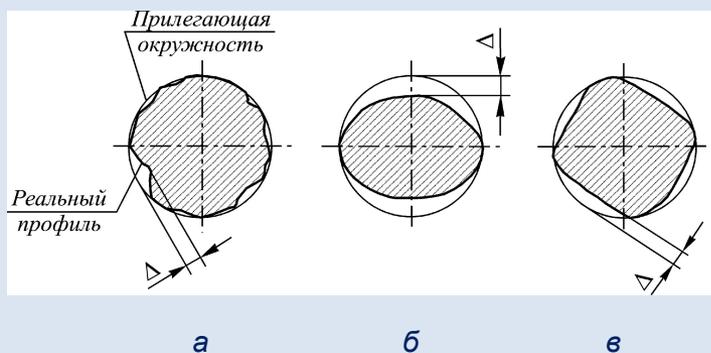


Рис. 37. Отклонение от круглости и ее частые виды:  
а – общий случай; частные виды: б - овальность;  
огранка (в)

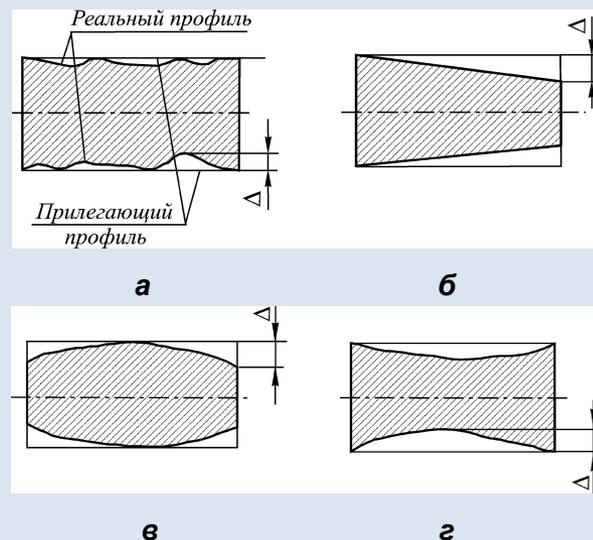


Рис. 38. Отклонение профиля продольного сечения  
и его частные виды:  
а – общий случай; частные виды: б – конусообразность;  
в – бочкообразность; г – седлообразность

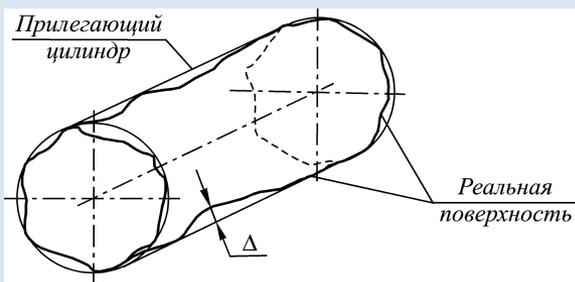
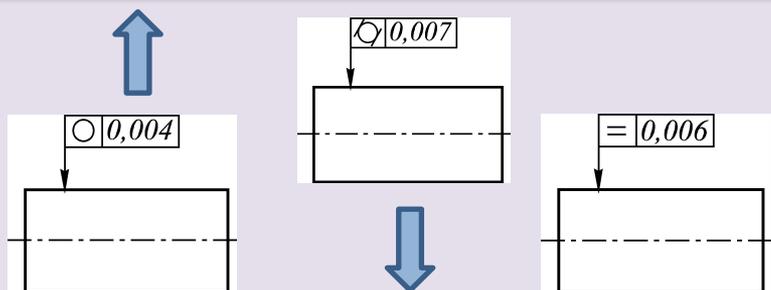


Рис. 39. Отклонение от цилиндричности

Согласно ГОСТ 24642-81 для каждого вида допуска формы установлено 16 степеней точности от 1 (точной) до 16 (грубой). В зависимости от соотношения между допуском формы и допуском размера установлено три уровня относительной геометрической точности:

- |               |                                    |   |
|---------------|------------------------------------|---|
| 1) нормальный | $\frac{T_{\phi}}{T_p} \cdot 100\%$ | 60 % (для плоских поверхностей),<br>30 % (для цилиндрических поверхностей);   |
| 2) повышенный |                                    | 40 % (для плоских поверхностей),<br>20 % (для цилиндрических поверхностей);   |
| 3) высокий    |                                    | 25 % (для плоских поверхностей),<br>12,5 % (для цилиндрических поверхностей). |

## Волнистость поверхности (РС 3951-73)

Волнистость поверхности представляет собой совокупность периодически повторяющихся неровностей на поверхности детали

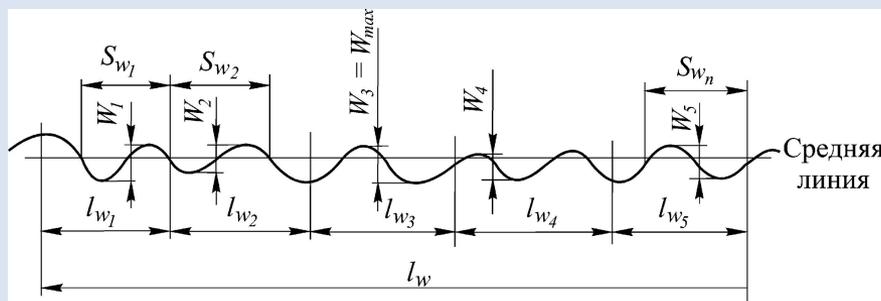


Рис. 40. Параметры волнистости поверхности

Высота волнистости  $W_z$

$$W_z = \frac{1}{5}(W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5)$$

Наибольшая высота волнистости  $W_{max}$

Средний шаг волнистости  $S_W$

$$S_W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{W_i} ; 40 \leq \frac{S_W}{W_z} \leq 1000.$$

## Шероховатость поверхности (ГОСТ 25142-82, ГОСТ 2789-73)

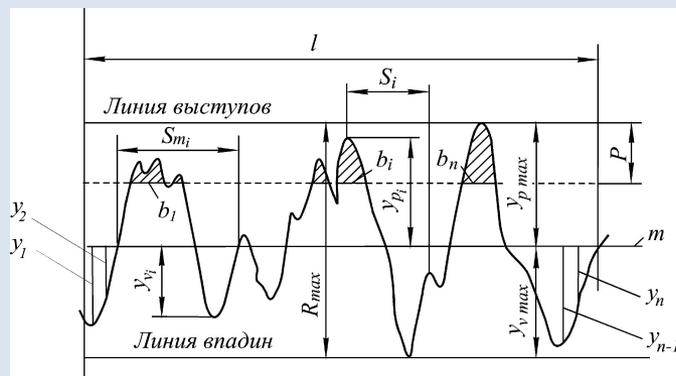


Рис. 41. Профилограмма к определению основных параметров шероховатости поверхности

Среднее арифметическое отклонение профиля

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Высота неровностей профиля по десяти точкам

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_i}|}{5}$$

Наибольшая высота неровностей профиля

$$R_{max} = y_{p,max} + y_{v,max}$$

Средний шаг неровностей профиля

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}$$

Средний шаг местных выступов профиля

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

Относительная опорная длина профиля

$$t_p = \frac{\eta_p}{l}; \quad \eta_p = \sum_{i=1}^n b_i \quad 39$$

# Механизм формирования шероховатости поверхности

На формирование шероховатости поверхности в процессе обработки оказывают влияние геометрия режущего инструмента, упругая и пластическая деформации материала, а также вибрации, имеющие место в технологической системе

## Механизм образования геометрической составляющей высоты микронеровностей

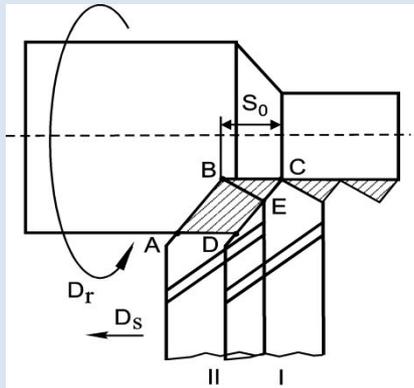
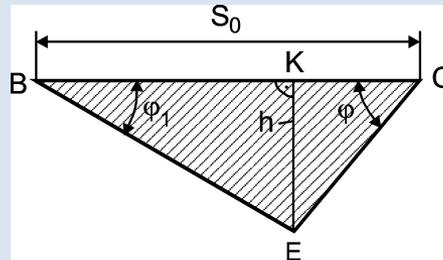


Рис. 42. Номинальное и остаточное сечения среза



ис. 43. Остаточное сечение среза с параметрами режима

$$h(Rz_p) = S_0 \left( \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi} \right)$$

$$h(Rz_p) = \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} \left[ S_0 - r \left( \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right]$$

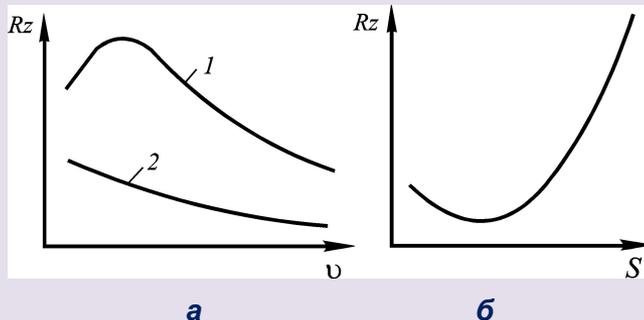


Рис. 44. Типовые зависимости  $Rz = f(v)$  (а) и  $Rz = f(S)$  (б):  
1 – для материалов, образующих нарост; 2 – для материалов не образующих нарост

## Механизм образования геометрической составляющей высоты микронеровностей

В условиях реального процесса обработки металлов резанием впереди режущего клина инструмента и под обработанной поверхностью образуется зона пластической деформации. Пластическая деформация вносит существенные изменения в регулярный профиль поверхности. В этом случае значение параметра можно определить по формуле

$$Rz = Rz_p + \Delta Rz$$

где  $Rz_p$  – геометрическая составляющая высоты микронеровностей (расчетная величина гребешков);

- приращение высоты неровностей. Это приращение является суммой трех слагаемых  $\Delta Rz = \Delta Rz_{\text{пл}} + \Delta Rz_{\text{упр}} + \Delta Rz_{\text{тр}}$

где  $\Delta Rz_{\text{пл}}$  – приращение высоты микронеровностей в результате пластического течения металла в направлении вершины остаточного гребешка;  $\Delta Rz_{\text{упр}}$  – приращение высоты микронеровностей, вызванное упругим восстановлением поверхностного слоя заготовки;  $\Delta Rz_{\text{тр}}$  – приращение, вызванное

трением задней поверхности инструмента об обработанную поверхность.

## Физико-химические характеристики поверхностного слоя

При резании поверхностный слой обрабатываемой детали деформируется и изменяются его физико-механические свойства: как правило, повышаются все прочностные характеристики (пределы прочности и текучести, твердость и микротвердость); понижается пластичность (относительное удлинение и поперечное сужение); изменяется форма и ориентация зерен и образуется текстура; появляются трещины внутри зерен и между ними и т.д.

Пластическая деформация поверхностного слоя может характеризоваться многими показателями, чаще всего физико-механические свойства материала поверхностного слоя оцениваются следующими основными показателями:

- 1) глубиной наклепанного слоя  $h_H$
- 2) степенью наклепа поверхностного слоя

$$\Delta H_v = \frac{H_{vH} - H_{vc}}{H_{vc}} \cdot 100\%,$$

где  $H_{vH}$  – наибольшая микротвердость поверхностного слоя;  $H_{vc}$  – микротвердость ненаклепанного материала (сердцевины);

- 3) градиентом наклепа

$$\Delta H_{gr} = \frac{H_{vH} - H_{vc}}{h_H},$$

- 4) величиной, характером распределения и знаком остаточных напряжений, действующих в поверхностном слое деталей.

Между степенью наклепа и его глубиной существует связь:

$$h_H = k \Delta H_v,$$

где  $k$  коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала детали и условий резания.

**Остаточные напряжения и наклеп являются следствием действия сил резания, нагрева материала обрабатываемой детали и структурных превращений.** При обработке заготовок лезвийным инструментом остаточные напряжения в поверхностном слое большинства конструктивных материалов образуются главным образом под действием силового поля. Температура имеет второстепенное значение. При обработке хрупких материалов остаточные напряжения - сжимающие, а при обработке пластичных материалов - чаще всего растягивающие.

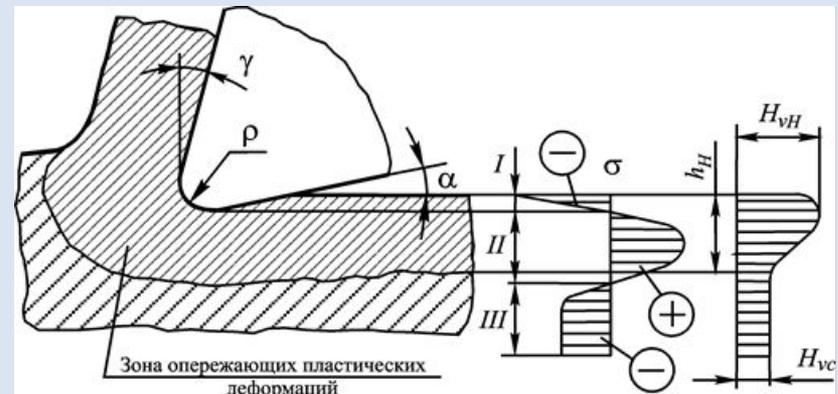


Рис. 45. Остаточные напряжения и микротвердость поверхностного слоя материала

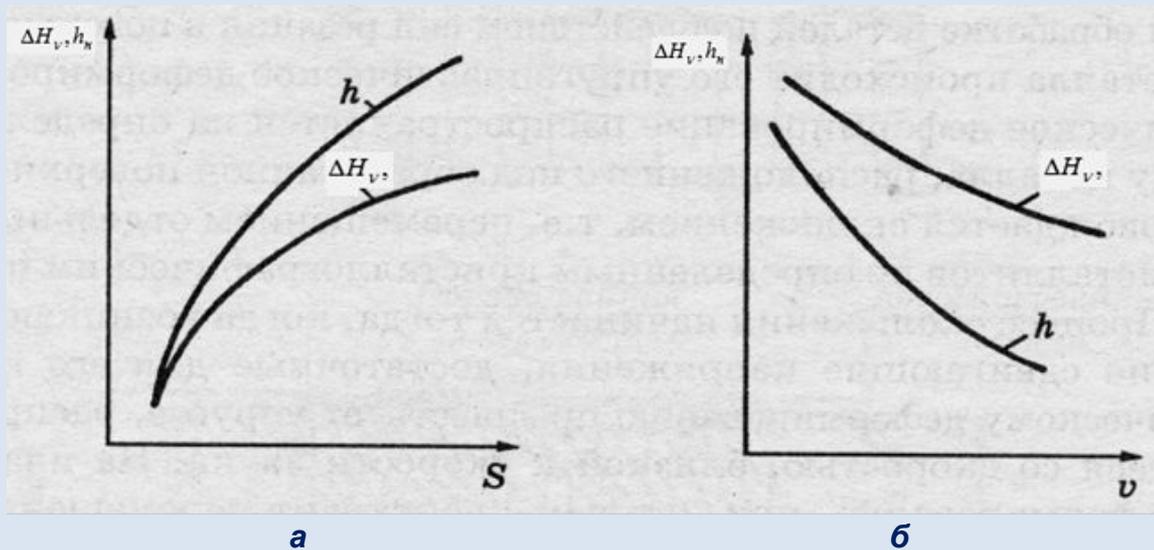


Рисунок 46 – Зависимости степени наклепа и глубины наклепа от подачи (а) и скорости резания (б) при точении

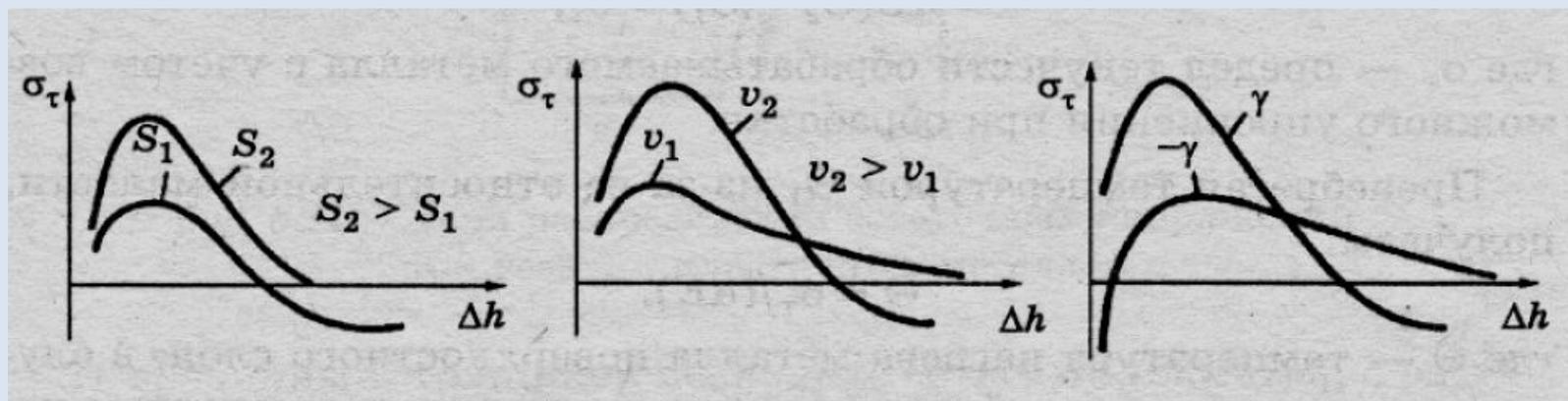


Рисунок 47 - Характер влияния условий резания на окружные остаточные напряжения и глубину их залегания

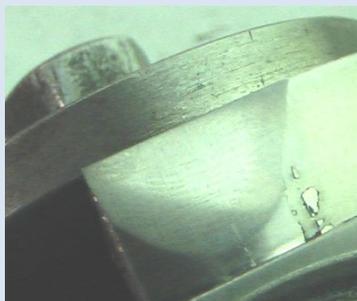
## Методы контроля микротвердости и остаточных напряжений



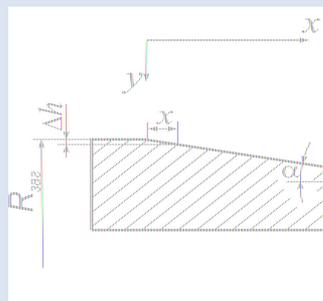
Рис. 48. Микротвердомер ПМТ-3



Рис. 50. Автоматизированная установка для определения остаточных напряжений



а



б

Рис. 49. Косой шлиф образца (а) и схема для определения величины  $\Delta h$  (б)

# Механизм формирования остаточных напряжений

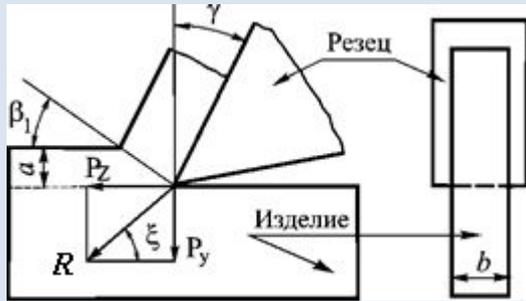


Рис. 51. Условная схема свободного резания пластичных материалов

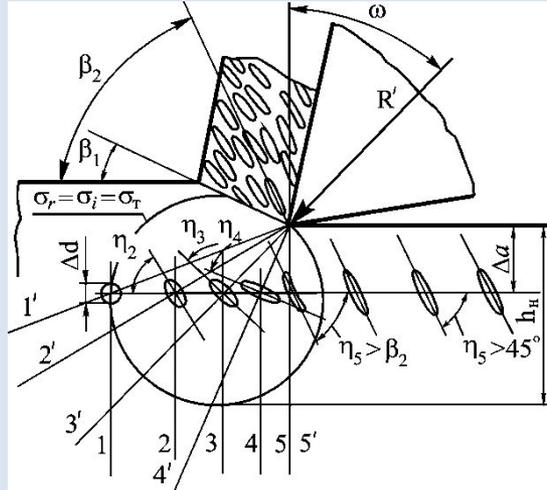


Рис. 53. Условная схема свободного резания пластичных материалов

Для свободного резания  
(для плоской деформации)

$$\sigma_r = -\frac{C_1 R' \cos \alpha}{r} \quad \alpha = \frac{\omega}{2}$$

$$\sigma_\tau = -\left( \frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2}}{x} - \sigma_\tau \right) \frac{(E - E') \cos \omega}{E(1 - \mu^2)};$$

$$\sigma_o = -\left( \frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2}}{x} - \sigma_\tau \right) \frac{\mu(E - E') \cos \omega}{E(1 - \mu^2)}.$$

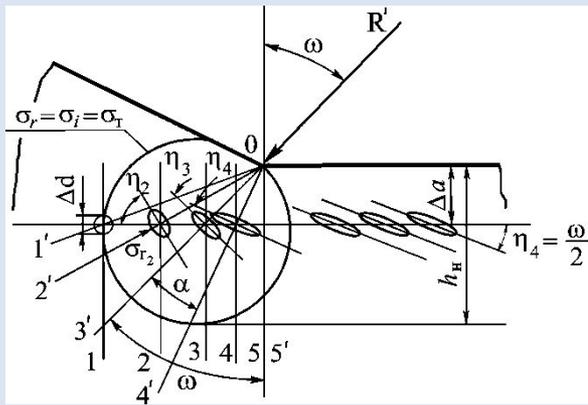


Рис. 52. Условная схема свободного резания малопластичных материалов

Для несвободного резания

$$\sigma_\tau = \left[ \frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2} \cos \varphi}{x_n + r(1 - \cos \varphi)} - \sigma_\tau \right] \frac{E - E'}{E(1 - \mu^2)} L_\tau; \quad \sigma_o = \left[ \frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2} \cos \varphi}{x_n + r(1 - \cos \varphi)} - \sigma_\tau \right] \frac{E - E'}{E(1 - \mu^2)} L_o \cos^2 \varphi.$$

$$L_\tau = \left( \sin^2 \frac{\omega}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\omega}{2} - \frac{\mu}{2} \right); \quad L_o = \left[ \mu \left( \sin^2 \frac{\omega}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\omega}{2} \right) - \frac{1}{2} \right];$$

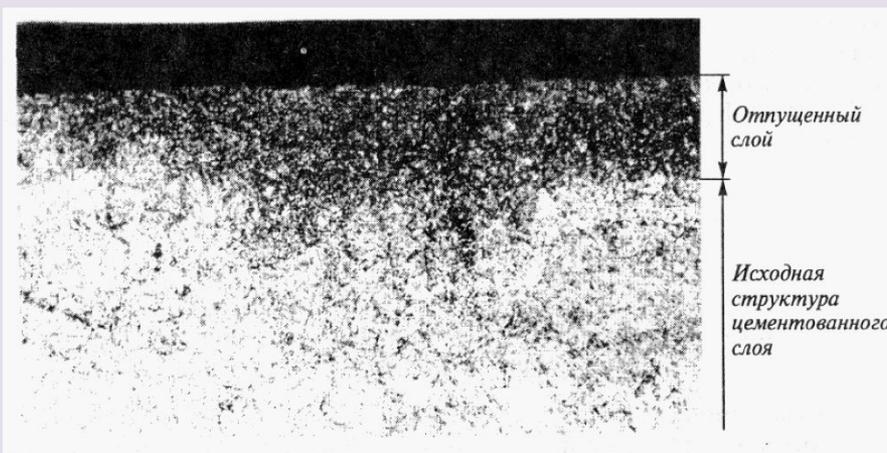
$$C_1 = \frac{4}{2(\pi + \beta_1) - \sin 2\omega + \sin(\omega - \beta_1)}; \quad x_n = (r + x') \cos \varphi - r.$$

## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

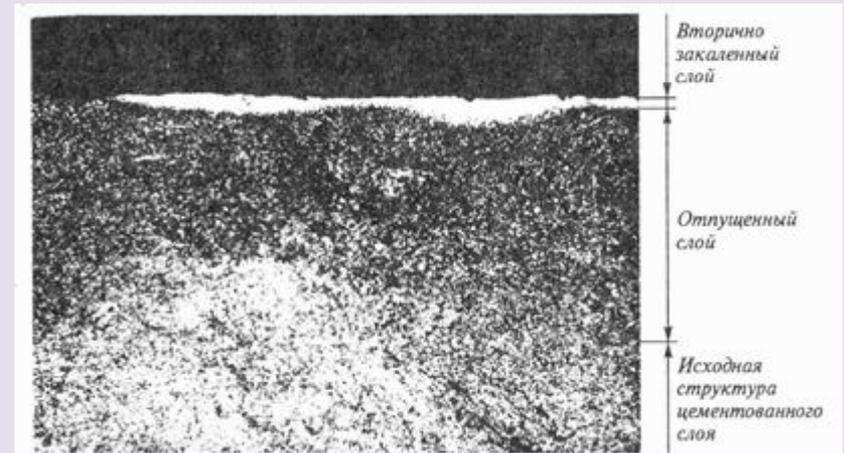
Эффективно устраняя деформации и коробление, возникающее при химико-термической обработке зубчатых колес, процесс зубошлифования может оказывать существенное влияние на качество поверхностного слоя рабочих поверхностей зубьев, т.е. на структурное и напряженное состояние и, как следствие на эксплуатационные свойства зубчатых колес.

При шлифовании порядка 80% от общей работы, совершаемой при формообразовании поверхностей, переходит в теплоту. В этих условиях среднетемпературная температура в зоне резания, а также скорости нагрева (до  $10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) и охлаждения (до  $10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) могут быть достаточными, чтобы в поверхностном слое произошли структурно-фазовые изменения (шлифовочные прижоги) или даже возникли микротрещины. В зависимости от мощности теплового источника, времени его действия, а также теплостойкости обрабатываемой стали структурно-фазовые изменения могут развиваться на различную глубину и представлять собой либо *прижоги отпуска*, либо *прижоги вторичной закалки с отпуском*.

*Прижоги отпуска* возникают в том случае, если температура поверхностного слоя в зоне контакта круга с заготовкой не превышает температуры фазовых превращений. Они состоят из продуктов распада мартенсита (троостита и троостосорбита) и металлографически проявляются в виде темнотравящегося слоя (рис. 54, а).



а



б

Рис. 54. Микроструктура поверхностного слоя зуба колеса из стали 12Х2Н4А с прижогом отпуска (а) и вторичной закалки с отпуском (б) [3]

**Прижоги закалки с отпуском** (рис. 54, б) возникают при нагреве шлифуемой поверхности выше температуры фазовых превращений и скорости охлаждения больше критической. Периферийная зона таких прижогов представляет собой вторично закаленный светлотравящийся слой, располагающийся над отпущенным слоем. Вторично закаленный слой имеет аустенитно-мартенситную структуру с нерастворившимися из-за кратковременного нагрева включениями карбидов. В этом слое сочетается высокая микротвердость с большим количеством остаточного аустенита (до 80%), имеющим сильно искаженную кристаллическую решетку. Образование своеобразной структуры вторично закаленного слоя вызвано одновременным действием импульсного нагрева до высоких температур, пластической деформацией от силы резания и интенсивным охлаждением.

Внешний вид прижогов на поверхности зуба зависит от способа шлифования. Участки с измененной микроструктурой, выявляемые методом травления, располагаются в виде темных (зоны отпуска) и светлых (зоны вторичной закалки) полос, вытянутых вдоль зуба при шлифовании тарельчатыми кругами с установкой кругов под углом  $0^\circ$  и штрихов в виде сетки при шлифовании тарельчатыми кругами с их установкой под углом  $15^\circ$ . Направление полос и штрихов совпадает с направлением движения шлифовального круга на поверхности зуба. При шлифовании на станках с абразивным червячным кругом прижоги имеют вид пятен овальной формы и штрихов, ориентированных вдоль зуба.

В настоящее время в производственных условиях основным методом контроля зубчатых колес на наличие прижогов является травление в специальных реактивах согласно производственной инструкции ВИАМа ПИ 1.2.183-81.

Технологические операции при травлении выполняют в следующей последовательности [3]:

- обезжиривание в фосфатно-щелочном растворе;
- промывка в теплой ( $50^\circ\text{C}$ ) и затем холодной проточной воде;
- травление в надсернической аммонии в течение 10...20 с до потемнения поверхности;
- промывка в воде и удаление шлама;
- осветление в растворе соляной кислоты и уротропина в течение 30...60 с;
- промывка в проточной воде и нейтрализация в 1...2%-ном растворе углекислого натрия;
- антикоррозионная обработка в 7...10%-ном растворе нитрата натрия.

Толщина структурно измененного слоя различна по высоте зуба и в большинстве случаев максимальна на его головке. По высоте зуба от головки к ножке существенно уменьшается толщина вторично закаленного и отпущенного слоя, что видно из рис. 55. При повышенных режимах шлифования на поверхности зуба образуются глубокие местные прижоги; вторично закаленный слой в них лежит на слое отпущенного металла.

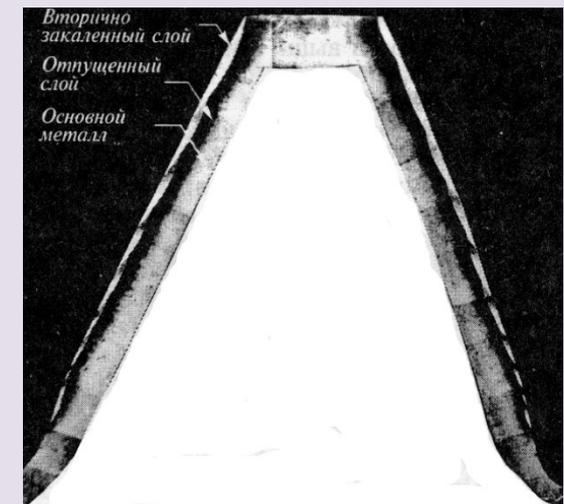


Рис. 55. Распределение прижогов по высоте зуба колеса из стали 12Х2Н4А после шлифования на станке 5831 на повышенном режиме [3]

## ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЬЕВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ С ПРИЖОГАМИ

Появление шлифовочных прижогов сопровождается образованием неоднородной структуры в поверхностном слое обработанных зубьев. В этом случае на рабочей поверхности зубьев могут присутствовать участки как с исходной структурой, так и участки с прижогами отпуска и прижогами вторичной закалки с отпуском, а это в свою очередь приводит к изменению микротвердости поверхностного слоя и его напряженно-деформированного состояния.

**Микротвердость поверхностного слоя.** Образование шлифовочных прижогов сопровождается изменением микротвердости поверхностного слоя. Микротвердость *в прижогах отпуска* отличается от микротвердости исходного материала (рис. 56). Её значение на поверхности тем меньше, чем толще отпущенный слой, так как чем глубже прижог отпуска, тем выше был нагрев при зубошлифовании и интенсивнее протекал процесс отпуска мартенсита.

Распределение микротвердости в прижогах *закалки с отпуском* (рис. 57) характеризуется тем, что на поверхности, во вторично закаленном слое (толщиной 5...10 мкм) микротвердость достигает значений равных 900...1000 HV, а при переходе к отпущенному слою она резко падает. Снижение микротвердости под вторично закаленным слоем определяется толщиной лежащего под ней отпущенного слоя.

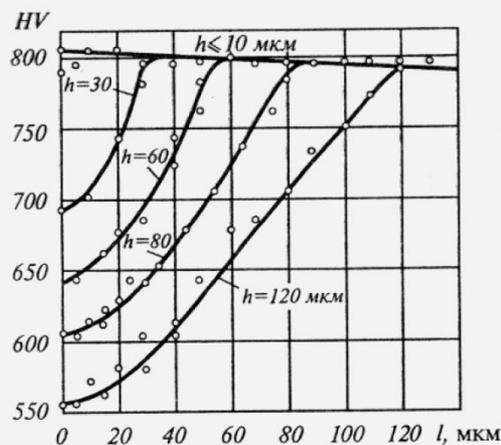


Рис. 56. Распределение микротвердости HV по толщине  $l$  поверхностного слоя стали 12Х2Н4А в прижогах отпуска разной глубины  $h$  [3]

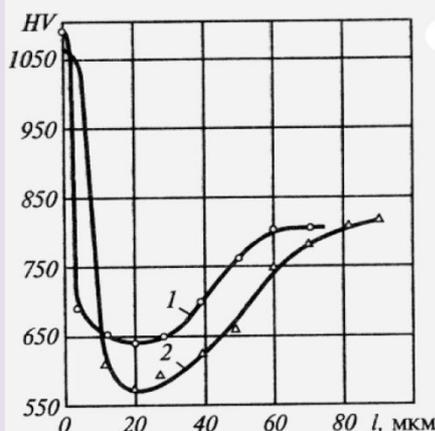


Рис. 57. Изменение микротвердости HV в прижогах закалки с отпуском глубиной 60 мкм (1) и 80 мкм (2) [3]

Исследованиями установлено, что зубчатые колеса, изготовленные из теплостойких сталей таких как 20Х3МВФ-Ш, 16Х3НВФМБ-Ш и др. менее склонны в возникновению шлифовочных прижогов по сравнению с нетеплостойкими сталями (12Х2Н4А, 20ХН3А и т.п.). При одинаковой глубине прижогов отпуска твердость на поверхности зубьев у колес из теплостойких сталей на 1-2 единицы по HRC выше, чем, например, у зубьев колес из нетеплостойкой стали 12Х2Н4А.

**Остаточные напряжения.** Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей в настоящее время наиболее часто осуществляется посредством метода Н.Н. Давиденкова. Этот метод относится к разрушающим методам контроля и основан на послойном удалении слоев материала методом травления у образцов, вырезанных из деталей, и непрерывном измерении деформаций у этих образцов.

У зубчатых колес, обработанных на режиме, не вызывающем возникновения шлифовочных прижогов (рис. 58, а; графики 3-4), в поверхностном слое рабочих поверхностей зубьев в окружном (тангенциальном) направлении формируются либо небольшие остаточные напряжения сжатия, либо (чаще всего) остаточные напряжения растяжения величиной 100...300 МПа.

При шлифовании на интенсивных режимах, сопровождающихся возникновением шлифовочных прижогов (рис. 53, б; при  $t = 0,06$  мм и  $t = 0,09$  мм), в поверхностном слое зубьев формируются остаточные напряжения растяжения. Их величина и характер распределения будут зависеть от средней контактной температуры в зоне резания, а также скоростей нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностей заготовки. Возникающие при прижогах отпуска сорбит, троостит и троостомартенсит, а при прижогах вторичной закалки – остаточный аустенит имеют меньший удельный объем по сравнению с мартенситом, что способствует формированию в поверхностном слое зубьев остаточных напряжений растяжения.

Следует отметить, что остаточные напряжения на ножке зуба несколько меньше, чем, например, в зоне делительной окружности, что обусловлено меньшей температурой нагрева верхних слоев и меньшей толщиной структурно измененного слоя. Это связано с тем, что по мере приближения к ножке зуба увеличивается его масса и, следовательно, улучшаются условия отвода теплоты из зоны обработки.

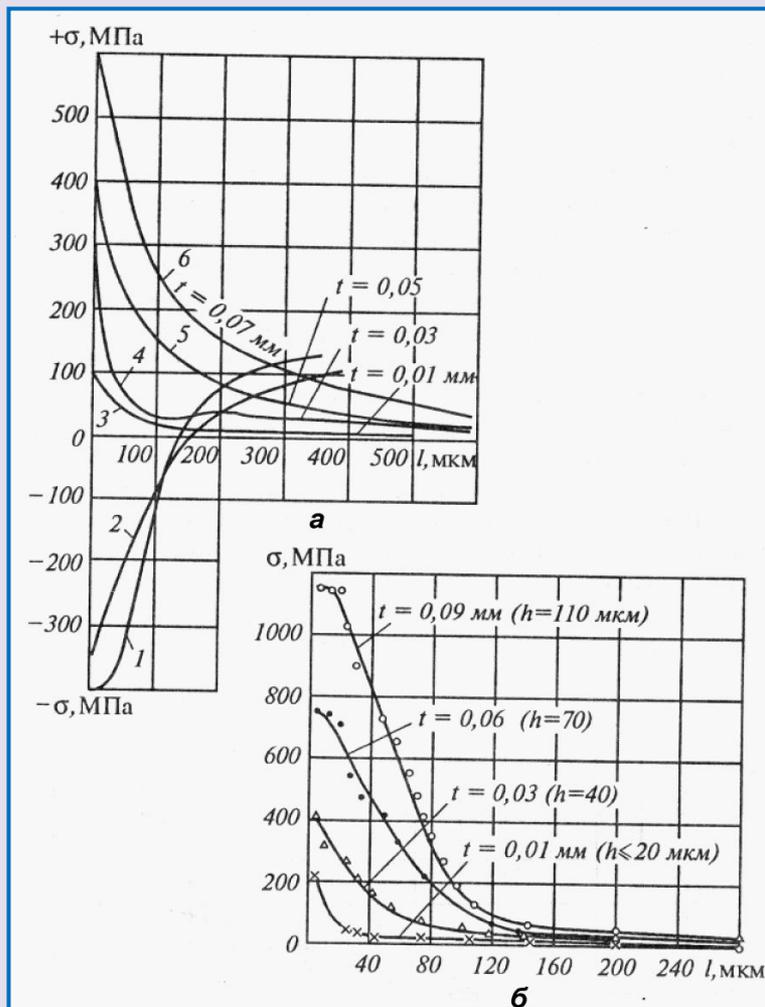


Рис. 58. Распределение остаточных напряжений по толщине  $l$  поверхностного слоя [3]:

а – зубьев колес из стали 12Х2Н4А (1 и 2 – до шлифования; 3-6 – после шлифования на станке 5831 с разной глубиной резания  $t$  и  $V_{пр} = 8$  м/мин); б – роликовых образцов из стали 20Х3МВФ-Ш после шлифования на станке 5831 с разной глубиной резания  $t$  и  $V_{пр} = 8$  м/мин

## Влияние шлифовочных прижогов на выносливость зубьев при изгибе.

Шлифовочные прижоги снижают сопротивление зубьев при изгибе. Из сравнительных испытаний установлено, что зубчатые колеса с прижогами имеют среднюю долговечность примерно в 1,4...1,6 раза меньшую по сравнению с зубчатыми колесами, отшлифованными без прижогов. Более низкая долговечность зубчатых колес с прижогами (глубиной в среднем 35...45 мкм) обусловлена действием факторов, облегчающих образование усталостной трещины: наличием у основания зубьев остаточных напряжений растяжения (250...350 МПа), структурной неоднородностью, пониженной твердостью поверхности (до 57 HRC), приводящей к излому зуба (рис. 59). Исключить влияние этих факторов возможно за счет применения зубчатых колес с нешлифованной впадиной. Высокий предел выносливости зубьев при изгибе обеспечивается, когда впадину зубьев выполняют с поднутренным основанием. Для этого зубчатые колеса перед химико-термической обработкой нарезают червячной фрезой с протуберанцем, обеспечивая подрезание ножки зуба на величину, равную припуску, снимаемому с боковой поверхности зуба при шлифовании. В этом случае в местах перехода от шлифованной части профиля к нешлифованной впадине уступы не образуются. При отсутствии подрезания неизбежно возникает уступ - концентратор напряжений у основания зуба.

Результаты исследования сопротивления усталости зубчатых колес с различной формой впадины зубьев (рис. 60) приведены на рис. 61 и 62.

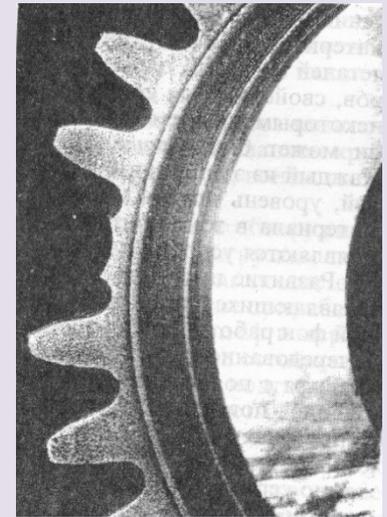


Рис. 59. Излом зуба у зубчатого колеса

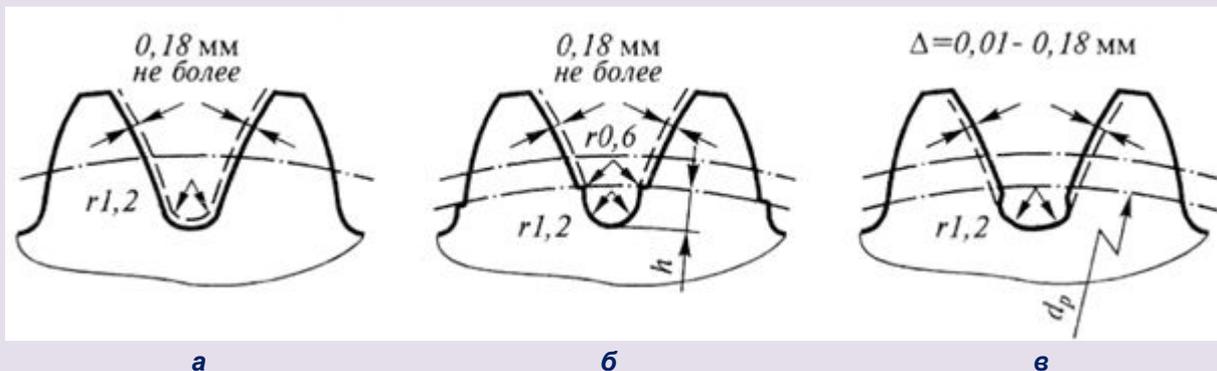


Рис. 60. Форма впадин зубьев

Как следует из кривых усталости, представленных на рис. 61 и 62, долговечность колес со шлифованной впадиной с поднутренным основанием зубьев в 2...2,5 раза выше, чем колес со шлифованной переходной кривой. Зубчатые колеса с нешлифованной впадиной с уступом у основания зуба не имеют преимущества со шлифованной переходной кривой. Линии усталости для этих двух типов колес практически совпадают. Усталостные разрушения колес с уступом, как правило, начинаются от имеющегося концентратора напряжений. Интенсивность влияния этого концентратора усиливают возникающие в месте уступа остаточные напряжения растяжения и шлифовочные прижоги.

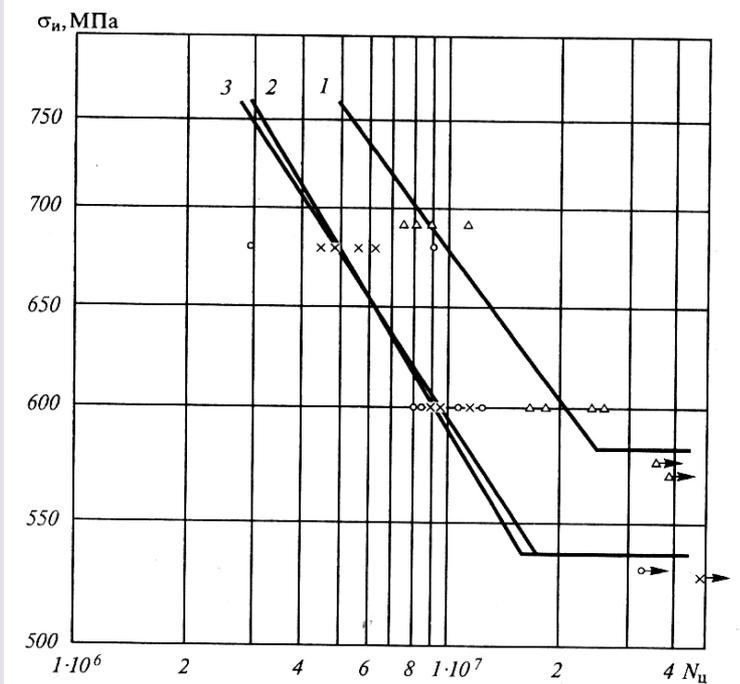


Рис. 61. Кривые усталости зубчатых колес из стали 12X2H4A [3]:

1- с нешлифованной впадиной с выкружкой; 2 – со шлифованной впадиной; 3 – с нешлифованной впадиной с уступом

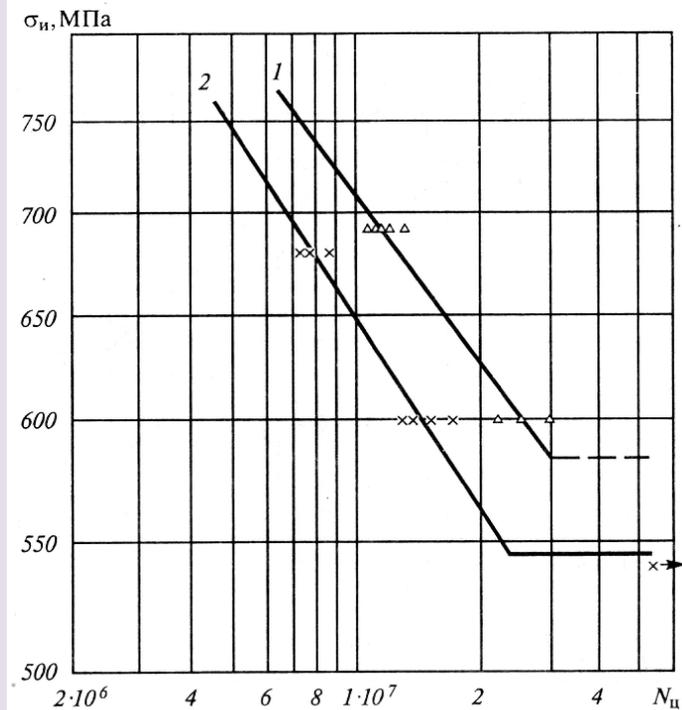


Рис. 62. Кривые усталости зубчатых колес из стали 12X2HВФА [3]:

1- с нешлифованной впадиной с выкружкой; 2 – со шлифованной впадиной

## ПРОГРЕССИВНЫЕ АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ

К прогрессивным абразивным инструментам, применяемым для процессов зубошлифования можно отнести **высокоструктурные и высокопористые абразивные круги**, а также **круги с прерывистой режущей поверхностью**, а именно: **прерывистые (рис. 63) и композиционные (рис. 64, 65)**. Идеи создания прерывистых и композиционных шлифовальных кругов принадлежат коллективам авторов соответственно во главе с А.В. Якимовым и В.Т. Чалым. Рабочая поверхность прерывистых шлифовальных кругов выполнена в виде чередующихся режущих выступов и впадин. У композиционных шлифовальных кругов впадины на рабочей поверхности круга заполнены твердой смазкой.

Основной тенденцией повышения работоспособности шлифовальных кругов на основе традиционных абразивов - корунда и карборунда в настоящее время является увеличение их **номера структуры приповерхностной пористости в 45-60% объема**, характерной для кругов, которые известны как "высокопористые".

**Принципиальная новизна высокоструктурного инструмента** заключается в том, что в нем при повышенной пористости заметно снижается объемное содержание абразивного зерна: с 38-42% при структурах 10-12 у высокопористых кругов до 26-30% при более высоких структурах 16-18. Количество зерен в зоне шлифования высокоструктурными кругами уменьшается до 40-50%, но пропорционально возрастает их число, которое соответствует так называемому "порогу резания" по глубине внедрения режущей кромки зерна, при которой начинается процесс диспергирования обрабатываемого материала. При этом существенно снижается доля зерен, которые не режут, а только деформируют металл в условиях высокоскоростного трения с сопутствующим интенсивным теплообразованием.

Таким образом, при шлифовании высокоструктурными кругами создаются физические предпосылки уменьшения общей энергоемкости процесса формообразования детали с минимальным термодинамическим воздействием на её обработанную поверхность без риска образования на ней прижогов и микротрещин. Появляются резервы интенсификации обработки с более экономичной правкой инструмента без ущерба для качества детали.

Наиболее востребованной и эффективной областью применения высокоструктурных кругов с повышенной пористостью стала обработка сложнофасонных деталей из вязких и твердых труднообрабатываемых сталей и сплавов и особенно на операциях профильного маятникового и глубинного шлифования. К ним относятся детали из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, зубчатые колеса и шлицевые соединения из нормализованных и закаленных сталей, фасонный режущий инструмент и другие ответственные детали машиностроения с возможностью как их предварительного формообразования (взамен лезвийный обработки), так и финишной точной обработки.

Важное направление использования высокоструктурных кругов - это эффективная реализация кинематических преимуществ схемы профильного глубинного шлифования деталей горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на никелевой основе.

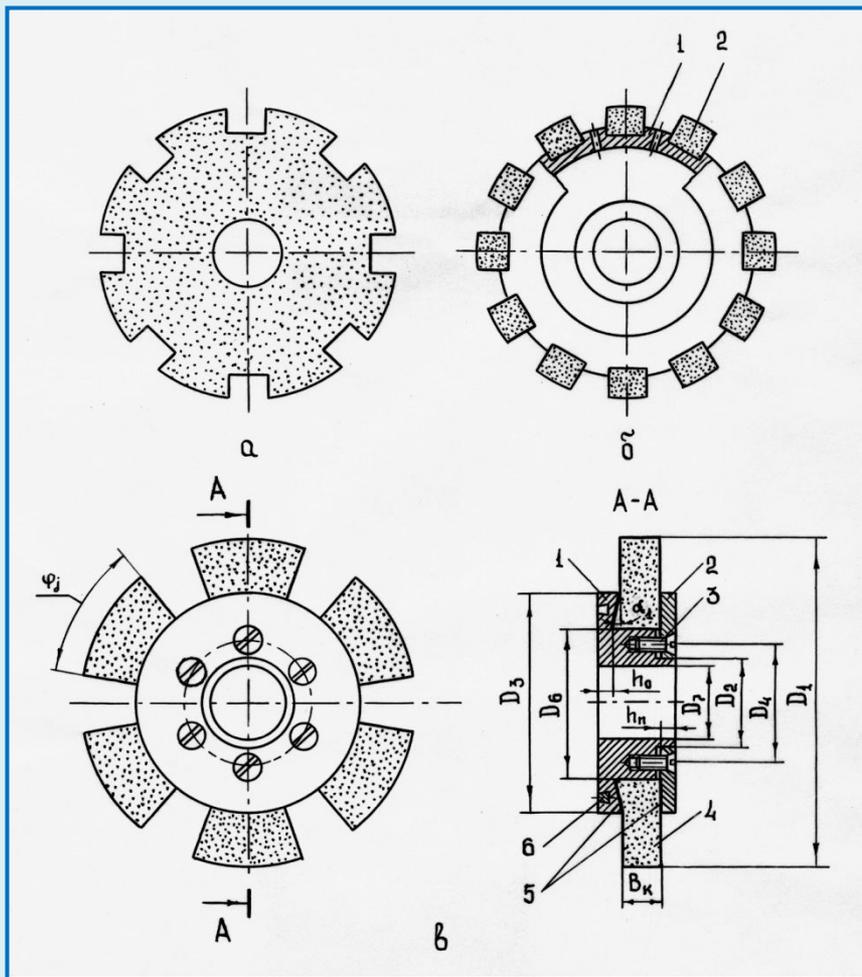


Рис. 63. Прерывистые шлифовальные круги:  
 а – цельный; б – составной (1 – корпус; 2 – абразивный элемент); в – сборный (1 – основной фланец; 2 – прижимной фланец; 3 – винт; 4 – абразивный сегмент; 5 – картонная прокладка; 6 – балансировочный сухарик)

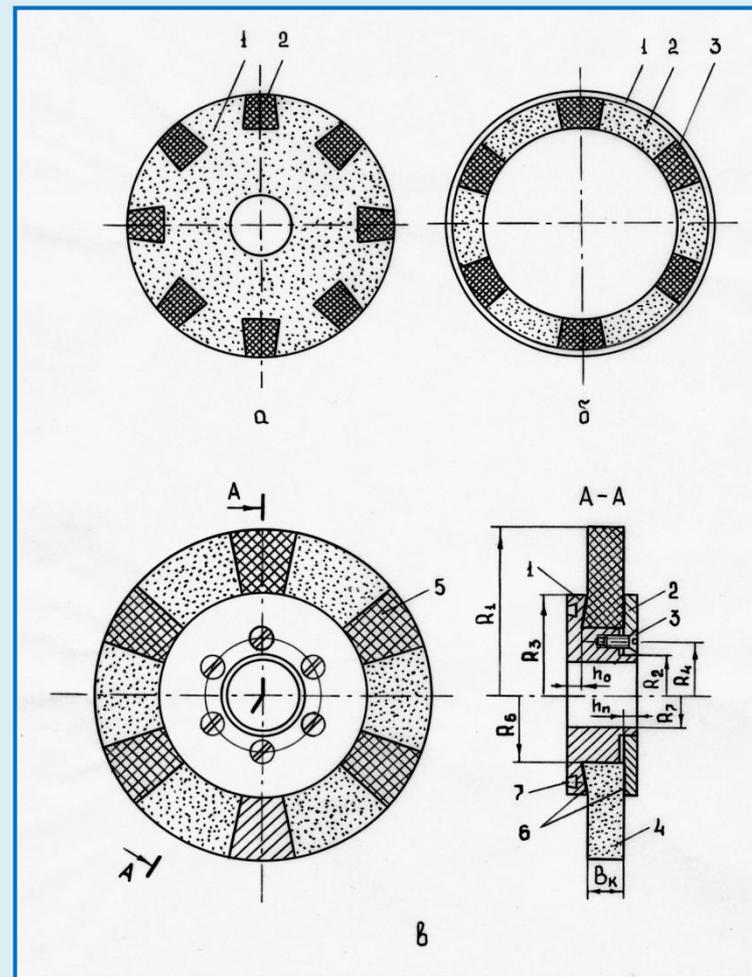


Рис. 64. Композиционные шлифовальные круги:  
 а – составной (1 – абразивная часть; 2 – смазывающе-охлаждающий элемент); б – составной для охватывающего шлифования (1 – бандажное кольцо; 2 – абразивный сегмент; 3 – смазывающе-охлаждающий сегмент); в – сборный (1 – основной фланец; 2 – прижимной фланец; 3 – винт; 4 – абразивный сегмент; 5 – смазывающе-охлаждающий сегмент; 6 – картонная прокладка; 7 – балансировочный сухарик)

Положительный эффект, достигаемый **шлифовальными кругами с прерывистой режущей поверхностью (прерывистыми и композиционными)**, обусловлен снижением в 1,2..1,6 раза сил резания и уменьшением времени действия теплового источника в зоне контакта круга с деталью.

Снижение сил резания и, следовательно, мощности, затрачиваемой на процесс резания, при шлифовании прерывистыми кругами связано с образованием «заборной поверхности» (рис 66). В начальный период времени после правки прерывистого круга условия работы зерен не отличаются от обычного шлифования, если не считать того, что за счет вырезов уменьшается общее количество зерен и соответственно увеличивается нагрузка на режущие зерна. Однако по мере увеличения натяга в системе станок-круг-заготовка и в связи с тем, что длина дуги контакта круга с заготовкой меньше протяженности впадин прерывистого круга основную силу удара при шлифовании воспринимают зерна, прилегающие к передней кромке рабочего выступа, под действием которой они интенсивно выкрашиваются из связки. По мере износа происходит самооформление профиля, т.е. на выступах образуется «заборная поверхность», имеющая спиральное очертание  $R_{кр} > R_1 > R_2$  и некоторый угол атаки  $\alpha$  к плоскости резания.

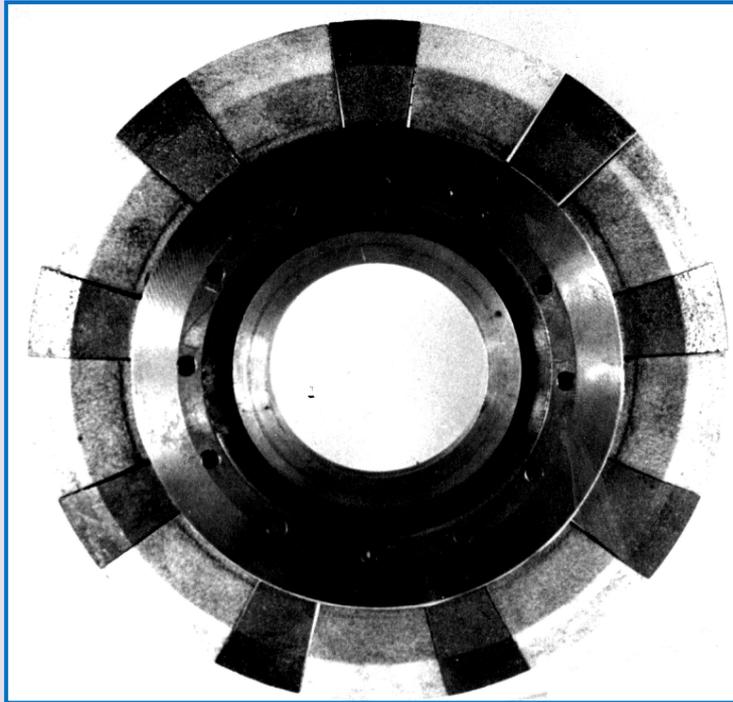


Рис. 65. Сборный композиционный круг для профильного зубошлифования

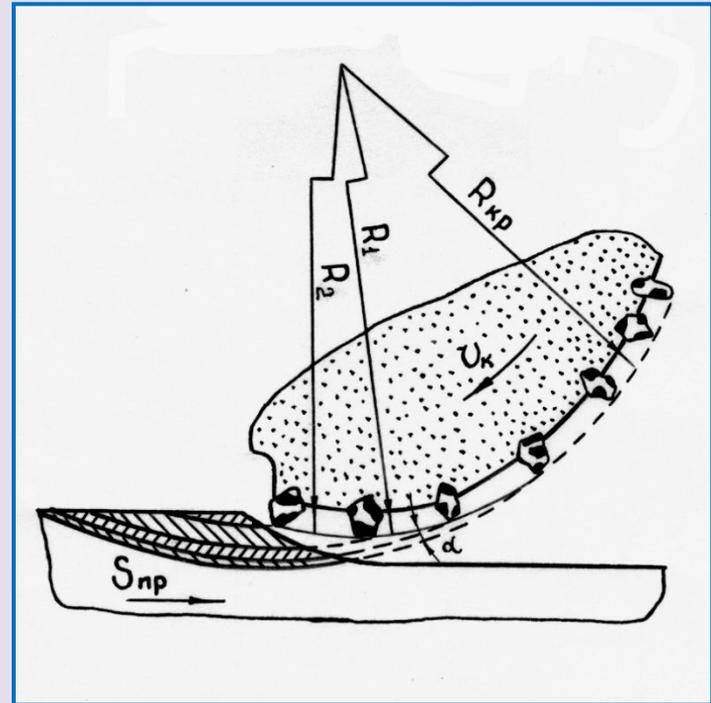


Рис. 66. Схема работы абразивных зерен при прерывистом шлифовании

А это приводит к перераспределению глубины резания между зернами, т.е. к коренному изменению схемы удаления припуска.

Снижение сил и мощности резания при шлифовании композиционными кругами происходит за счет внесения твердой смазки в зону обработки.

При шлифовании деталей кругами со сплошной режущей поверхностью каждая точка обрабатываемой поверхности, проходя зону контакта круга с деталью в течение времени  $\tau_k$  (рис. 67) находится под воздействием теплового источника, что приводит к интенсивному росту среднеконтактной температуры. Иная картина наблюдается при шлифовании кругами с прерывистой режущей поверхностью. В период нахождения рассматриваемой точки обрабатываемой поверхности в зоне контакта круга с деталью время нахождения её под воздействием теплового источника сокращается за счет прерывания его действия в связи с прохождением

впадинами прерывистого и смазывающе-охлаждающими элементами (СОЭ) композиционного кругов зоны контакта. А если учесть, что за период нахождения рассматриваемой точки в зоне контакта круга с деталью впадины и смазывающе-охлаждающие элементы вышеупомянутых кругов успевают пройти через нее несколько раз и во время их прохождения осуществляется интенсивный отвод тепла из этой зоны, т.е. ее охлаждение, то значения среднеконтактной температуры при шлифовании абразивным инструментом с прерывистой режущей поверхностью существенно меньше, чем при шлифовании сплошными кругами. Многочисленными исследованиями установлено, что при использовании прерывистых шлифовальных кругов среднеконтактная температура в зоне резания может быть снижена на 15...25%, а при использования композиционных кругов на 25...40%.

При шлифовании кругами с прерывистой режущей поверхностью в поверхностном слое деталей формируются также меньшие значения растягивающих остаточных напряжений нежели чем при работе серийными кругами со сплошной режущей поверхностью.

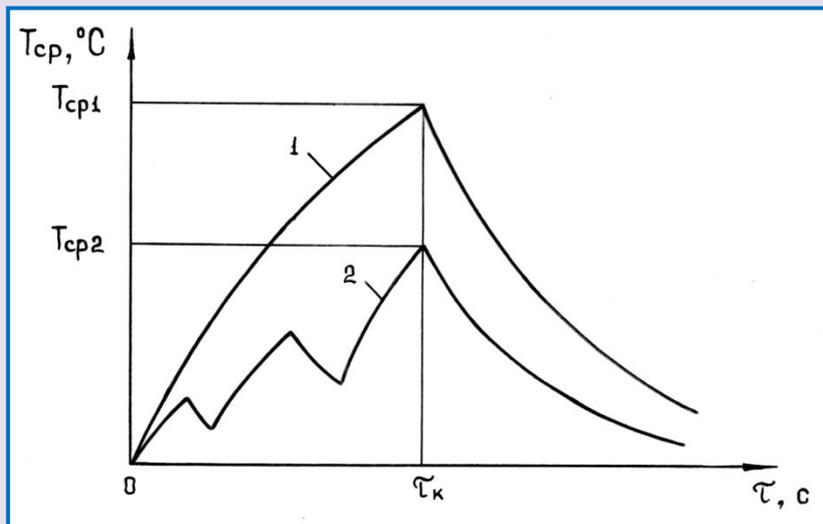


Рис. 67. Влияние процесса прерывистого шлифования на среднеконтактную температуру:

1 – круг со сплошной рабочей поверхностью; 2 – круг с прерывистой рабочей поверхностью;  $T_{ср1}$  – среднеконтактная температура при шлифовании кругом со сплошной рабочей поверхностью;  $T_{ср2}$  – среднеконтактная температура при шлифовании кругом с прерывистой режущей поверхностью

- 1. Рыжкин, А.А. Режущий инструмент: учебное пособие /А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, А.Г. Схиртладзе, А.И. Боков, М.М. Алиев. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 405 с.**
- 2. Солоненко, В.Г. Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие для вузов / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин . – М.: Высшая школа, 2007 – 414 с.**
- 3. Елисеев, Ю.С. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей: произв.-практ. издание /Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин, Н.М. Рыжов; Под ред. Ю.С. Елисеева. – М.: Высшая школа, 2001. – 493 с.**