



МОСКОВСКИЙ АТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

# **ШЛИФОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

*УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ*

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(МАДИ)

Кафедра технологии конструкционных материалов

Утверждаю  
зав. кафедрой,  
д-р техн. наук, проф.  
\_\_\_\_\_ Л.Г. Петрова  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ШЛИФОВАНИЕ  
И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ  
ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

*УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ*

МОСКВА  
МАДИ  
2019

УДК 621. 9.02  
ББК 34.63-5  
ИЗ9

*Авторы:*

В.Д. Александров, Ю.Н. Калачёв, Б.А. Кудряшов, М.В. Морщилов

ИЗ9 Шлифование и расчет параметров процесса резания при шлифовании: учебно-методическое пособие/ В.Д. Александров [и др.]. – М.: МАДИ, 2019. – 50с.

Учебно-методическое пособие по разделу «Шлифование и расчет параметров процесса резания при шлифовании» соответствует рабочим программам дисциплины «Технология конструкционных материалов» для студентов 1- го и 2- го курсов всех механических специальностей МАДИ

## ВВЕДЕНИЕ

Шлифование как метод обработки известен человеку с незапамятных времен: тем или иным способом обтачивались и шлифовались практически все создаваемые человеком орудия охоты и предметы быта. На камнях из породы песчаников затачивались стальные клинки.

С развитием промышленности, особенно в начале 19 века, серьезно возросла потребность в шлифовальных или, как сейчас принято называть, абразивных материалах. В Европе и Америке были найдены месторождения особенно удачных по структуре точильных камней. В России в те годы точильный камень разрабатывали только в районе Печоры – другие места не были известны. Камень этот так и называли «печора».

Рост спроса на шлифовальные камни «взвинтил» цены на все естественные абразивные материалы (искусственных еще не изобрели). Кстати, и термин «абразивы» еще не существовал, он появился много позднее: в сороковых годах прошлого столетия. Высокие цены на точильный камень стимулировали поиск искусственных абразивных материалов. В этом деле успех выпал на долю американского изобретателя Э. Ачесона. Он, расплавив в дуговой электропечи смесь из кварцевого песка, каменного угля и поваренной соли, получил зеленовато-черные кристаллы конической формы. Анализ показал, что это карбид кремния. Его называли карборундом. Тогда он был самым твердым после алмаза веществом. Год рождения карбида кремния – 1890-й. С этого времени фактически стало развиваться и производство абразивного инструмента.

В 30-х годах XX века советский ученый академик А.Е. Ферсман, подчеркивая значение производства абразивных материалов и инструмента, сказал, что трудно назвать отрасль промышленности, которая была бы важнее, чем абразивная, для развития и успешного роста самых разнообразных отраслей народного хозяйства и индустрии страны в целом.

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Целью работы является изучение абразивных (абразиво, *лат.* – царапать, скоблить) инструментов при шлифовании, выбор шлифовальных кругов и расчет параметров процесса резания заготовок на шлифовальных станках, а также подготовка студентов к выполнению технологического задания во время учебно-технологической практики.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

**Шлифование** – технологический способ обработки заготовок резанием с помощью специальных абразивных инструментов, режущим элементом которого являются очень большое число абразивных зерен из минералов и сверхтвердых материалов. Эти зерна (рис. 1), произвольно расположенные на рабочей поверхности, обладающие высокой твердостью (200–240 МПа) и острыми режущими кромками, соединены специальными связующими веществами и представляют собой абразивный инструмент, изготовленный в виде шлифовальных кругов, брусков, головок, сегментов, шкурков (рис. 2). Применяют зерна в виде паст и просто порошков.

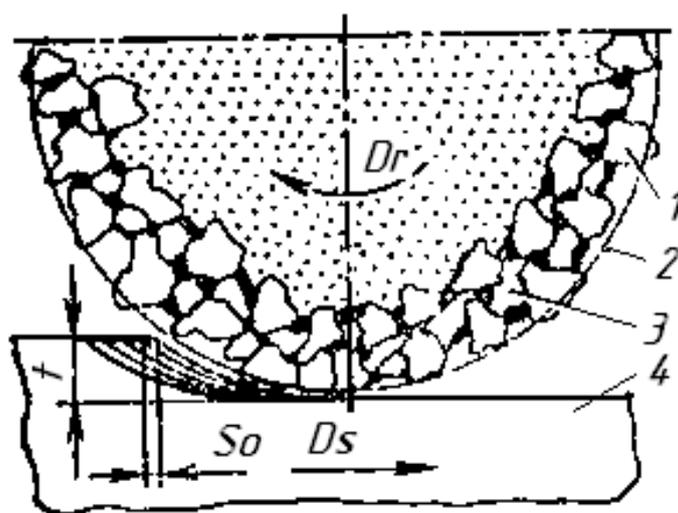


Рис. 1. Схема процесса резания абразивными зернами:  
1 – зерна; 2 – связка; 3 – поры; 4 – заготовка

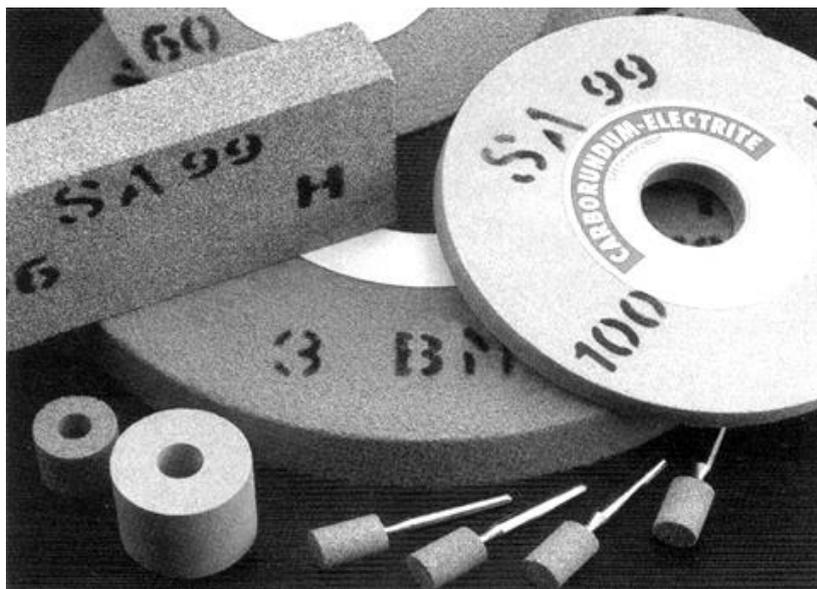


Рис. 2. Основные виды абразивных инструментов

Выступающие зерна абразивного материала, имеющие высокую твердость и прочное закрепление в круге связующим (цементирующим) веществом, при вращении круга с большой скоростью (до 100 м/с) производят массовое микрорезание (царапание) поверхностного слоя заготовки, удаляя с нее в виде мелкой стружки определенный слой.

Одновременное участие в работе большого числа зерен обеспечивает высокую производительность процесса абразивной обработки, а также возможность осуществления процесса резания при весьма малых глубинах, что позволяет достигать высокой точности и малой шероховатости обработанной поверхности. Чем больше зерен участвует в резании, тем меньше шероховатость.

*Шероховатость – совокупность микронеровностей (чередующихся выступов и впадин) с относительно малыми расстояниями между их вершинами.*

Шероховатость поверхности характеризуется средним арифметическим отклонением профиля от средней линии  $R_a$  и высотой неровностей  $R_z$ .

В качестве базовой линии для оценки поверхностей неровностей используется *средняя линия  $m$* , относительно которой отсчитываются отклонения профиля.

Для определения  $R_z$  находят на участке профилограммы длиной  $L$  (где  $L$  – базовая длина) по 5 наибольших максимумов и минимумов (рис. 3) и рассчитывают по этим десяти точкам значения  $R_z$ :

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |y_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |y_{i\min}| \right], \quad (1)$$

где  $y_i$  – расстояние расчетных точек от средней линии профиля  $m$ .

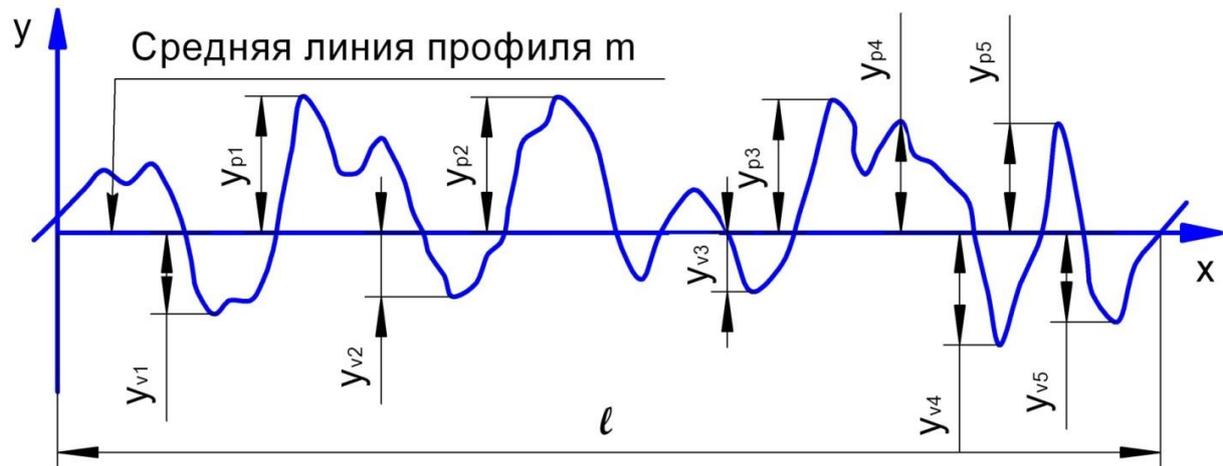


Рис. 3. Профилограмма шероховатой поверхности (высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ )

Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  (рис. 4) рассчитывают по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2)$$

где  $n$  – число точек профиля.

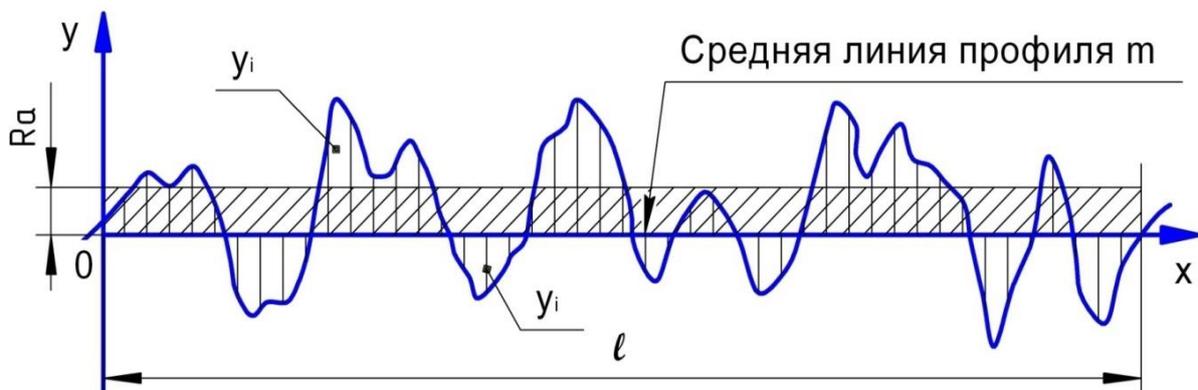


Рис. 4. Профилограмма шероховатой поверхности (среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ )

Шлифование чаще всего проводят при окончательной стадии обработки (на чистовых и отделочных операциях), выполняемой после лезвийных операций резания (точения, фрезерования, строгания и др.).

Шлифование абразивными кругами является универсальным и наиболее распространенным технологическим методом абразивной обработки. Для формообразования поверхностей необходимо иметь вращательное движение абразивного круга (**главное движение –  $D_r$** ) и относительное **движение подачи –  $D_s$**  заготовки или инструмента вдоль или вокруг координатных осей.

Элементами резания являются скорость резания –  $V$ , подача –  $S$  и глубина резания –  $t$ . Под **скоростью резания  $V$**  при шлифовании понимают периферийную окружную скорость абразивного круга, м/с:

$$V = \pi \cdot D_k \cdot n_k / (1000 \cdot 60),$$

где  $D_k$  – наружный диаметр шлифовального круга, мм;  $n_k$  – частота вращения круга, мин<sup>-1</sup>.

**Подача  $S$**  измеряется величиной перемещения заготовки вдоль координатной оси за время одного её оборота, мм (см. рис. 1).

**Глубина резания  $t$**  определяется толщиной слоя материала, срезаемого за один рабочий ход, мм (см. рис. 1).

Оптимальные режимы резания выбирают по справочной литературе.

### 3. АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Абразивные инструменты работают в условиях высоких давлений, сил трения и температур. Следовательно, одним из важнейших свойств абразивных материалов должна быть их высокая твердость, износостойкость и теплостойкость (свойство сохранять твердость при высоких температурах, возникающих при резании).

Абразивные материалы различают по *геометрической форме и размерам, типу абразивного материала, зернистости, связки, твердости и структуре*. Зерна абразивных инструментов представляют собой природные минералы и искусственные материалы.

Из природных минералов применяют корунд, наждак, кварц, кремень, алмаз.

*Корунд* – горная порода, состоящая в основном из кристаллического оксида алюминия –  $Al_2O_3$  с небольшой примесью кварца и других минералов, химически связанных с оксидом алюминия. Количество и состав примесей определяют цвет корунда (красный, бурый, синий, желтый, серый, белый). Твердость корунда по шкале Мооса 9.

Корунд применяют для изготовления полировальных паст и шкурок.

*Шкала́ Мо́оса (минералогическая шкала твёрдости)* – десятибалльная шкала, созданная для ориентировочной оценки относительной твёрдости материалов методом царапания. Разбиение шкалы по баллам основано на наборе эталонных минералов. В качестве эталонов приняты 10 минералов, расположенных в порядке возрастающей твёрдости (см. табл. П4).

*Предложена в 1811 г. немецким минералогом Фридрихом Моосом.*

*Наждак* – мелкозернистая горная порода, состоящая в основном из корунда с примесью пирита, магнезита, кварца и ряда других минералов в различных соотношениях. Твердость наждака по шкале Мооса 7–8. Наждак используется для изготовления абразивных шкурок, при полировании и притирке совместно работающих деталей.

*Кварц* – широко распространенный минерал; представляет собой безводную кристаллическую кремневую кислоту –  $SiO_2$  (диоксид кремния – кремнезем); твердость по шкале Мооса 7. Кварц в виде песка, зерна которого имеют округлую форму, применяют для шлифования и полирования различных материалов, а также для изготовления шлифовальных шкурок на тканевой или бумажной основах.

*Кремень* – однородная плотная горная порода, состоящая из кремнезема с примесью карбонатов глинистых веществ и органических остатков. В природе кремень встречается в виде массивных горных пород и гальки. Кремень, имея примерно одинаковую твердость с кварцем, является более эффективным абразивным материалом, поскольку у его зерен более острые кромки.

*Алмаз* – вещество, обладающее самой большой твердостью среди всех известных в природе материалов (по шкале Мооса 10).

Алмаз – это одна из кристаллических модификаций углерода. Другой широко известной модификацией углерода является графит. Несмотря на полную тождественность химического состава, графит и алмаз резко различаются по свойствам. *Графит* – очень мягкое вещество; он является проводником электричества, а алмаз – диэлектриком. Графит плавится при температуре 3850°C, а алмаз сгорает на воздухе при 850–950°C; графит имеет гексагональную (шестигранную) структурную решетку, а алмаз – кубическую кристаллическую решетку.

В природе алмаз встречается в виде отдельных монокристаллов и их обломков или в виде сросшихся кристалликов. Из алмазов изготовляют абразивный инструмент, а также режущие и буровые инструменты. В связи с высокой твердостью и низким коэффициентом трения алмаза по металлу он обладает исключительной стойкостью на истирание, превышающей значительно стойкость обычных абразивных материалов.

К искусственным материалам относятся электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, кубический нитрид бора и синтетические алмазы. Искусственные абразивные материалы, по сравнению с природными, обладают большей стабильностью физико-механических свойств и более высоким качеством, что обуславливает широкое применение их в промышленности.

*Электрокорунд* – абразивный материал, состоящий из корунда (кристаллического оксида алюминия –  $Al_2O_3$ ) и небольшого количества примесей. Его получают в результате плавки высокосортных бокситов или глинозема (чистый оксид алюминия) в электрических печах при температуре около 2050°C. Полученный электрокорунд дробят и сортируют на зерна различных размеров (шлифовальное зерно, шлифовальный порошок, микропорошки).

Промышленность производит несколько разновидностей электрокорунда (нормальный, белый, хромистый, титанистый, циркониевый и монокорунд), которые в зависимости от содержания оксида алюминия и примесей имеют различный цвет, структуру и свойства.

*Карбид кремния* (карборунд) является химическим соединением кремния и углерода ( $SiC$ ), с твердостью по шкале Мооса 9. Он получает-

ся из кварцевого песка при сплавлении его с углеродом (коксовым порошком). В электропечах при нагреве свыше  $1900^{\circ}\text{C}$  кремнезем, содержащийся в кварцевом песке, вступает в химическое взаимодействие с углеродом, образуя при этом карбид кремния. Химически чистый карбид кремния бесцветен, а технический окрашен в различные цвета от зеленого до черного и отличается металлическим блеском. Полученный карбид кремния подвергают дроблению и сортируют. Он выпускается двух видов: черный карбид кремния и зеленый карбид кремния.

*Карбид бора* ( $\text{B}_4\text{C}$ ) является химическим соединением бора с углеродом, получаемым восстановлением в электрической печи борного ангидрида (технической борной кислоты) углеродом (коксовым порошком). По внешнему виду карбид бора представляет собой черную сплавленную массу, после дробления которой получают зерна с острыми режущими кромками. Содержание карбида бора в абразивных материалах не превышает 93%. Обладающий большой твердостью (по шкале Мооса 9,3) и высокой хрупкостью, карбид бора уступает только алмазу и кубическому нитриду бора.

*Кубический нитрид бора* (КНБ) представляет собой синтез химического соединения бора и азота, получаемого в результате обработки нитрида бора в специальной камере под высоким давлением (до  $50 \cdot 10^3$  МПа) и при температуре (до  $2500^{\circ}\text{C}$ ). КНБ содержит 44% бора и 56% азота. В процессе изготовления КНБ представляется возможным в довольно широких пределах варьировать его физико-механические и эксплуатационные свойства путем изменения параметров синтеза (давления, температуры, времени выдержки). Отечественная промышленность выпускает КНБ под марками кубонит, эльбор-Л и эльбор-Р для изготовления абразивного инструмента различного назначения.

*Синтетические алмазы.* Алмазы, полученные искусственным путем, принято называть синтетическими, а не искусственными, так как они по своим свойствам ничем не отличаются от природных. Промышленный синтез алмазов осуществляется в специальных камерах при воздействии на графит высокого давления (до  $50 \cdot 10^3$  МПа) и температуры (до  $2500^{\circ}\text{C}$ ). Синтез проводят в присутствии металлов –

растворителей (никеля, марганца, железа). Время синтеза колеблется от десятков минут до нескольких часов, при этом происходит перекристаллизация углерода из гексагональной структуры графита в кубическую структуру алмаза (рис. 5).

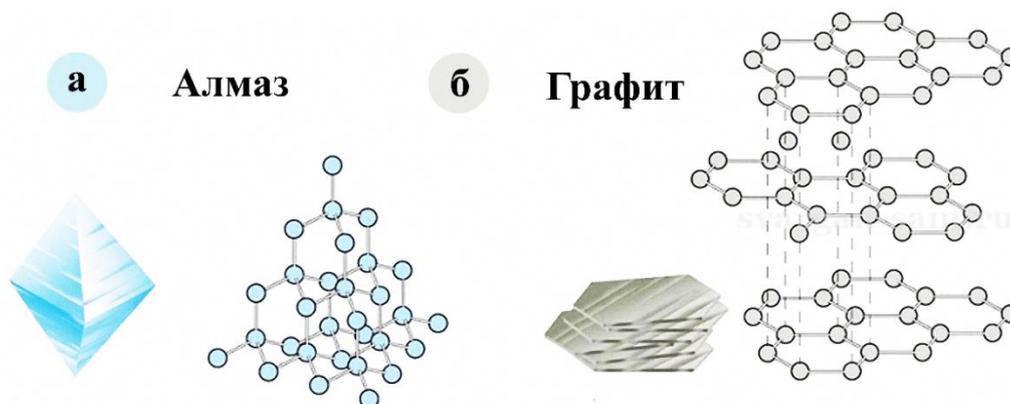


Рис. 5. Кристаллическая решетка алмаза (а) и графита (б)

В промышленности используют как природный (марки А), так и синтетические алмазы (марок АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС). Из-за высокой хрупкости алмаза его не применяют в инструментах при обработке черных металлов. При этом успешно используют синтетические алмазные инструменты при обработке цветных металлов, прочных пластмасс, керамики, жаропрочных сталей и сплавов.

**Зернистость (крупность).** Важнейшей характеристикой абразивного инструмента является зернистость абразивных зерен. Зернистость существенно влияет на качество шлифуемой поверхности: для чистовой обработки применяют мелкозернистый инструмент, черновой – крупнозернистый.

Абразивные материалы дробятся в шаровых мельницах, после чего полученные зерна сортируются по размерам. После дробления зерна имеют неправильную многогранную форму с пирамидальными и несколько округленными вершинами. Размер зерен колеблется от 3,5 до 5000 мкм.

Зерна абразивного материала разделяют по крупности на группы и номера. Установлено четыре группы зернистости: шлифовальное зерно; шлифовальные порошки; микропорошки; тонкие порошки. Основной характеристикой номера зернистости является количество и

крупность основной фракции. Номер зернистости связан с размерами зерен (в мкм) основной фракции. Крупная зернистость применяется для предварительного черного шлифования, средняя зернистость – для обычного шлифования и для заточки инструментов; мелкая зернистость предназначена для чистого шлифования. Микропорошки и тонкие порошки применяют для резьбошлифования и тонкой доводки.

Чем крупнее зерна, тем больше производительность режущего инструмента и выше шероховатость обрабатываемой поверхности. Чем мельче зерно, тем ниже производительность, но меньше шероховатость.

**Связка.** При изготовлении инструмента зерна скрепляют друг с другом с помощью цементирующего вещества – связки. Наполнитель в связке предназначен для придания абразивному инструменту необходимых физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств. Наиболее широко применяют абразивные инструменты, изготовленные на керамической, бакелитовой или вулканитовой связке.

*Керамическую связку (К1–К8)* готовят из глины, полевого шпата, кварца и других веществ, тонко измельчая и смешивая их в определенных пропорциях. Абразивный инструмент на керамической связке отличается высокой прочностью на разрыв, жесткостью и теплостойкостью; он хорошо отводит тепло из зоны резания, обладает высокой пористостью и хорошо сохраняет приданную ему форму.

*Бакелитовая связка (Б1–Б4)* состоит в основном из синтетической смолы – бакелита с различными наполнителями. Обладая высокой удельной прочностью и упругостью, она широко используется для изготовления различных шлифовальных и отрезных кругов, головок, сегментов и специальных инструментов, применяемых как при черновом, так и при чистовом шлифовании.

*Вулканитовая связка (В1–В4)* представляет собой каучук, подвергнутый вулканизации для превращения его в прочный, твердый эбонит. На вулканитовой связке изготавливают жесткие и гибкие абразивные инструменты. Жесткие круги на вулканитовой связке обладают большей прочностью и упругостью, чем на бакелитовой связке, и поэтому применяются для изготовления тонких кругов, используемых при скоростях шлифования до 50 м/с.

Номер разновидности указывает на различие как по составу, так и по способу изготовления абразивного инструмента.

**Твердость.** Твердость абразивного инструмента характеризуется сопротивляемостью связки вырыванию абразивных зерен с рабочей поверхности под действием сил резания. Острые грани абразивных зерен в процессе обработки постепенно затупляются, возрастает давление на зерно, и когда давление превысит сопротивляемость связки, зерна выкрашиваются с поверхности инструмента, обнажая новые острые зерна. В последующем шероховатость рабочей поверхности зерен постепенно уменьшаются, переходя к менее шероховатой поверхности. Это свойство абразивного инструмента восстанавливать свою режущую способность называется *самозатачиваемостью*. Самозатачивание имеет и негативную сторону: одновременно с восстановлением режущих свойств происходит изменение формы режущей поверхности и размеров инструмента.

Абразивным инструментам присуще также явление «засаливания» режущей поверхности, когда поры между абразивными зернами плотно заполняются частицами обрабатываемого металла и шлама.<sup>1</sup>

Вершины абразивных зерен не выступают из инструмента и не способны осуществлять процесс резания. Восстановление режущих свойств поверхности инструмента при засаливании возможно только с помощью удаления засаленного слоя поверхности инструмента. Засаливание предотвращают применением высокопористых кругов или подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) под напором через абразивный инструмент в процессе абразивной обработки. Чем легче абразивные зерна вырываются (выкрашиваются) из инструмента, тем его считают мягче, и наоборот.

Правильный выбор твердости инструмента является фактором, определяющим его стойкость и производительность процесса шлифования. Абразивный инструмент подразделяется на 9 категорий твердости, включающие 12 степеней твердости (табл. 1).

---

<sup>1</sup> Шлам – отходы, продукты разрушения в абразивной обработке.

Классификация абразивного инструмента по твердости

Категория твердости	Степень твердости	Категория твердости	Степень твердости
Черезвычайно мягкий	ЧМ	Среднетвердый	СТ1; СТ2; СТ3
Весьма мягкий	ВМ1; ВМ2	Твердый	Т1; Т2
Мягкий	М1; М2; М3	Весьма твердый	ВТ1; ВТ2
Среднемягкий	СМ1; СМ2		ЧТ1; ЧТ2
Средний	С1; С2	Черезвычайно твердый	

**Примечание.** Цифры 1, 2, 3, указанные в обозначении, характеризуют степень твердости в порядке ее возрастания.

**Структура.** Структура абразивного инструмента характеризуется процентным соотношением абразивных зерен, связки и пор. Различают 19 номеров структур (от 0 до 18): плотная – 0, 1, 2, 3, 4 (рис. 6, а); среднеплотная – 5, 6, 7, 8 (рис. 6, б); открытая – 9, 10, 11, 12 (рис. 6, в); высокопористая – 13, 14, 15, 16, 17, 18 (рис. 6, г). Чем меньше номер структуры, тем плотнее расположены абразивные зерна. Увеличение номера структуры соответствует уменьшению в инструменте абразивных зерен и увеличению объема воздушных пор. Поры на режущей поверхности обеспечивают лучший отвод тепла и служат для размещения стружки и шлама.

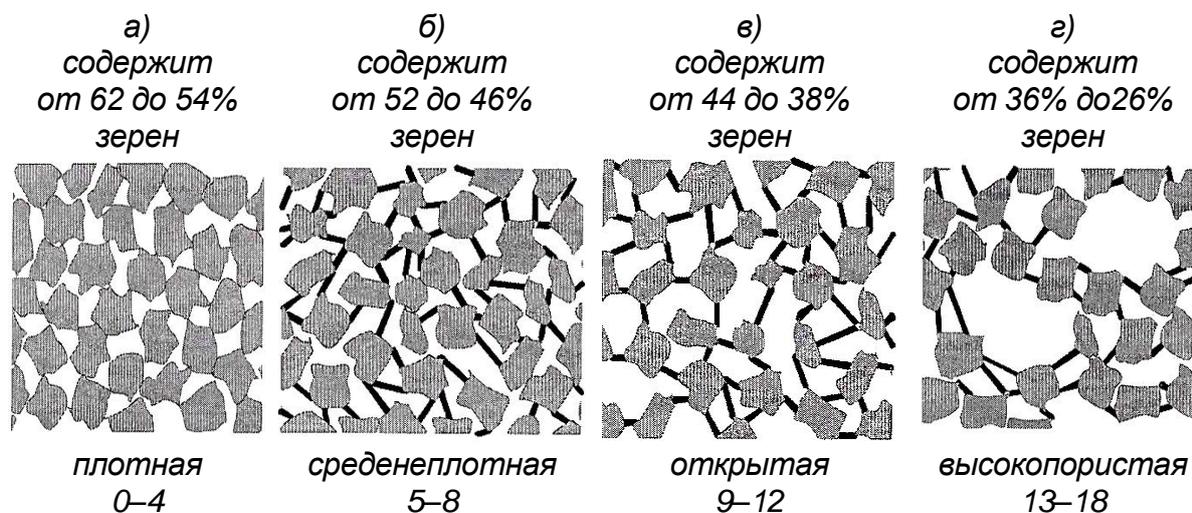


Рис. 6. Структуры абразивного инструмента

Абразивный инструмент с плотной структурой применяют при доводочных работах и при профильном шлифовании. Наиболее часто используют инструмент со средней структурой, а с открытой и высокопористой структурой – при шлифовании вязких материалов и тонкостенных деталей. Схема конструкции и поверхность абразивного инструмента показана на рис. 7.

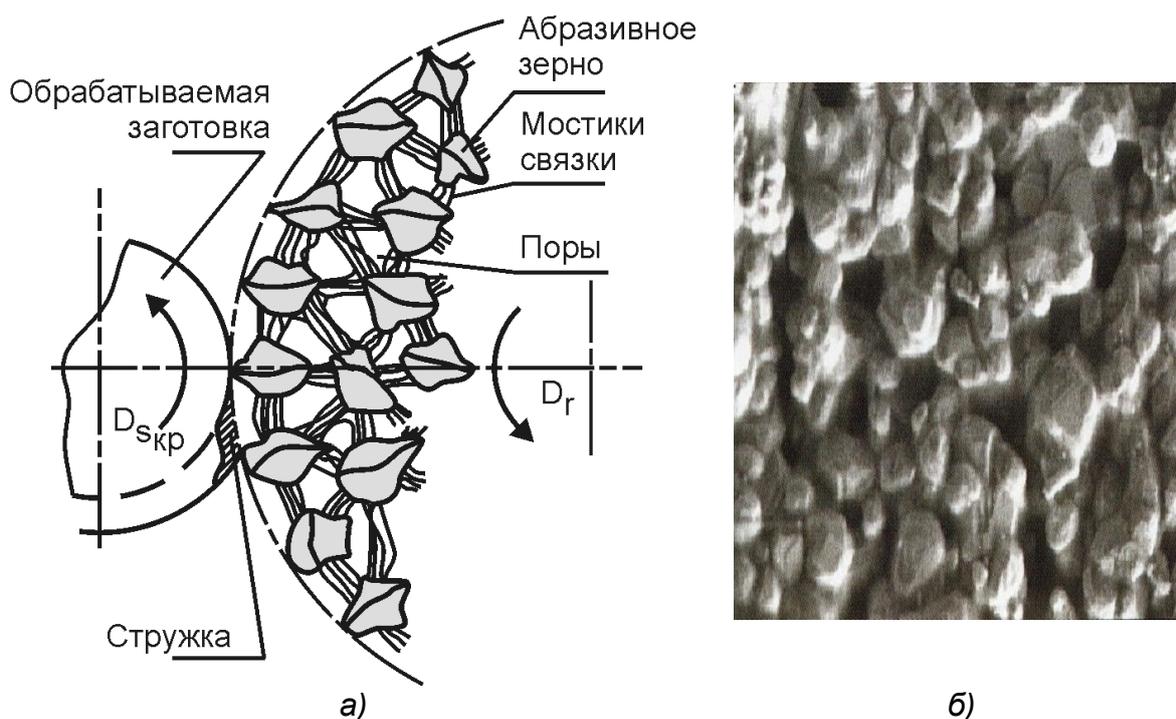


Рис. 7. Схема конструкции (а) и поверхность (б) абразивного инструмента

#### 4. СИЛА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Процесс резания всегда сопровождается приложением сил в зоне контакта инструмента и заготовки. Эти силы необходимо оценивать количественно в связи с тем, что именно от них зависят параметры всей технологической системы. Это также относится и к расчету элементов шлифовальных станков, конструированию приспособлений для работы на них и оценке точности обработки.

Снятие припуска с заготовки инструментом, в том числе абразивным, сопровождается действием силы  $P$ , которая отделяет лишний слой материала в виде стружки. У лезвийных инструментов (резцов, сверл, фрез и т.п.) довольно просто представляется воздействие силы

резания  $P$  или ее составляющих ввиду явно выраженных режущих элементов, геометрических параметров инструментов, движений и т.п. У абразивного инструмента в силу конструктивных особенностей нет единой режущей кромки, так как в процессе резания участвуют одновременно большое количество абразивных зерен.

Сила резания или равнодействующая сила ( $R$ ) сопротивления резанию при шлифовании может быть разложена на три взаимно-перпендикулярные составляющие силы (рис. 8).

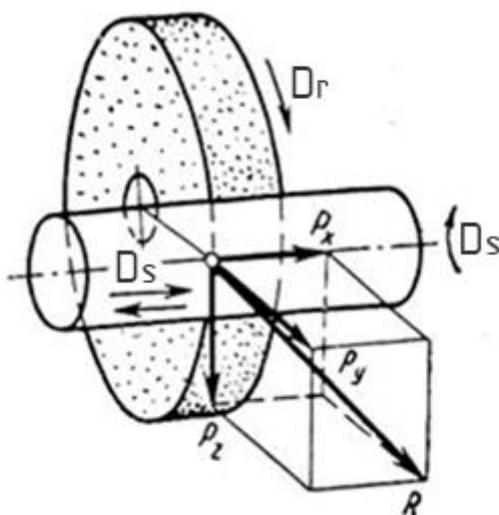


Рис. 8. Силы резания при шлифовании

$P_x$  – осевая сила (сила подачи);  $P_y$  – радиальная сила;  $P_z$  – тангенциальная сила. Наибольшей из сил является радиальная сила  $P_y$ , отжимающая заготовку от шлифовального круга и деформирующая в горизонтальной плоскости. Большее значение силы  $P_y$  по отношению к тангенциальной силе  $P_z$  объясняется тем, что внедрение зерен в обрабатываемую заготовку затруднено наличием неправильной их геометрической формы и округленных вершин, вызывающих отрицательное значение переднего угла. По силе  $P_z$  может быть определена мощность электродвигателя станка, необходимая для вращения шлифовального круга и на вращение заготовки.

Мощность электродвигателя, затрачиваемая на вращение шлифовального круга, определяется по формуле, кВт,

$$N_k = P_z \cdot V_k / (10^3 \eta_1).$$

Мощность электродвигателя, приводящего во вращение заготовку равна, кВт,

$$N_{\text{заг}} = P_z \cdot V_{\text{заг}} / (60 \cdot 10^3 \eta_2),$$

где  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  – соответственно КПД кинематических цепей передачи вращения кругу и заготовке.

Сила  $P_x$  воздействует на механизм подачи станка. Но ее величина при шлифовании методом продольной подачи незначительна и поэтому в расчет не принимается.

Значения составляющих силы резания позволяет судить о механизме срезания припуска и влиянии на него таких параметров как режим обработки, обрабатываемый материал, характеристика шлифовального круга, а также о состоянии режущей поверхности абразивного круга.

Величина силы резания зависит от скорости заготовки, подачи и глубины шлифования и с увеличением данных параметров – сила резания возрастает. С повышением скорости шлифования значение силы резания уменьшается.

## 5. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ШЛИФОВАНИЯ

В машиностроении шлифованию подвергают различные поверхности деталей машин: плоские, цилиндрические фасонные, внутренние, наружные и т.п. Наиболее часто обрабатывают поверхности деталей имеющих ось вращения (валы, втулки, резьбы и др.), а также плоские поверхности (плоскости, уступы, пазы и др.). Существуют различные схемы шлифования данных поверхностей (рис. 9). Для всех схем шлифования главным движением резания является вращательное движение шлифовального круга ( $D_r$ ), а движение подачи ( $D_s$ ) совершает заготовка.

### 5.1. Обработка заготовок на плоскошлифовальных станках

Плоскошлифовальные станки бывают:

- с горизонтальным и вертикальным шпинделем;
- с прямоугольным и круглым столом;

- с работой периферией круга<sup>2</sup> или торцевой поверхностью круга;
- с возвратно-поступательным движением стола и с вращательным движением стола.

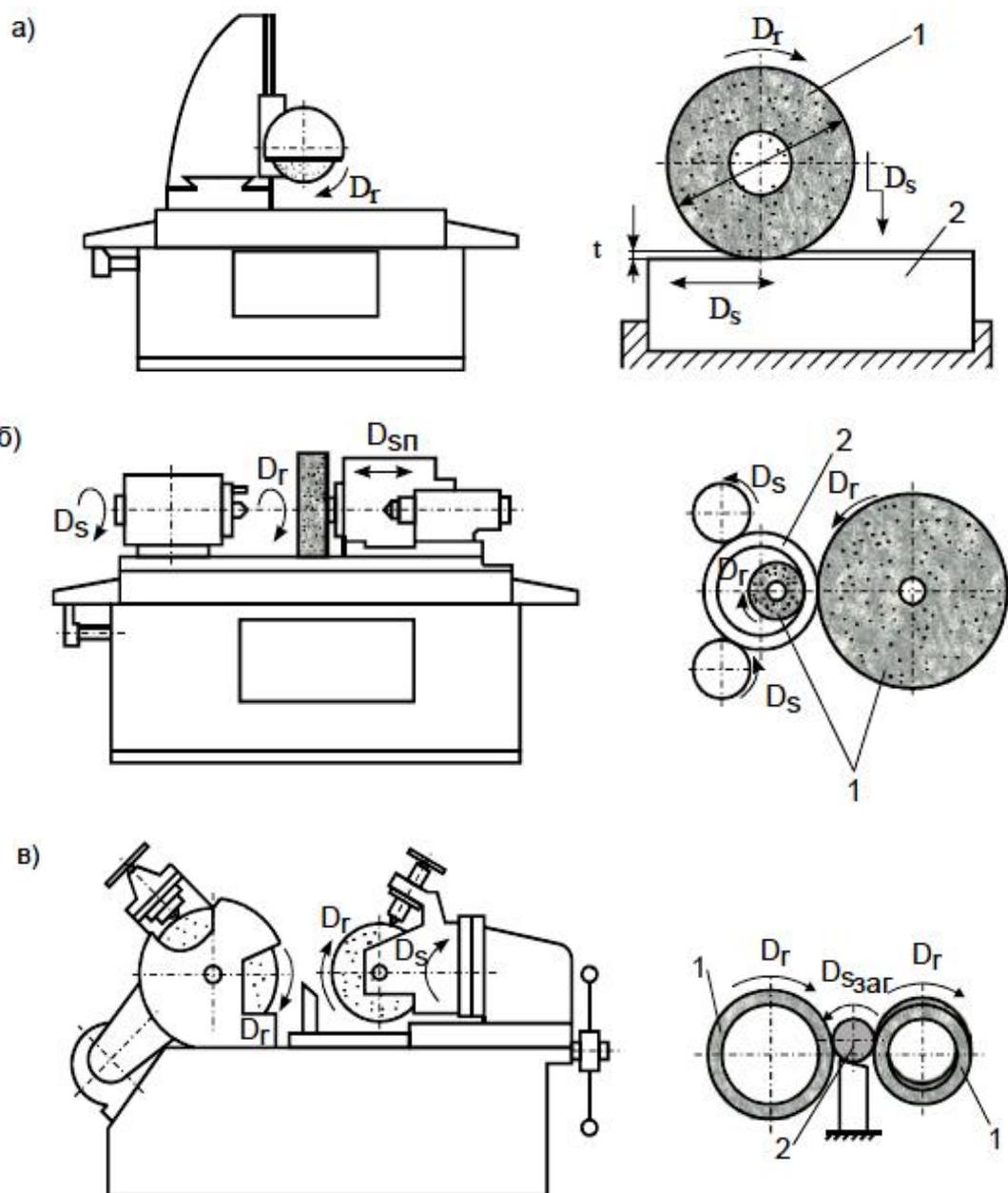


Рис. 9. Шлифовальные станки и основные виды шлифования:  
 а – плоское; б – круглое; в – бесцентровое; 1 – инструмент; 2 – заготовка

Плоскошлифовальные станки **с продольным столом, работающие периферией круга**, используются для обработки узких и длинных заготовок (рис. 10, а). Заготовки, обрабатываемые этим ме-

<sup>2</sup> Периферия круга – цилиндрическая режущая поверхность круга.

тодом, устанавливают на плоском столе и закрепляют либо механически, либо, что чаще всего, – на магнитной плите. Столу с заготовкой сообщается возвратно-поступательное движение ( $D_{спр}$ ), а шлифовальному кругу, кроме главного движения, при каждом ходе стола сообщается поперечная подача ( $D_{сп}$ ). Вертикальная подача ( $D_{св}$ ) также сообщается кругу, но только после того, как будет закончена обработка всей поверхности при данной глубине резания. При плоском шлифовании периферией круга обеспечивается наиболее высокая точность и качество обрабатываемой поверхности.

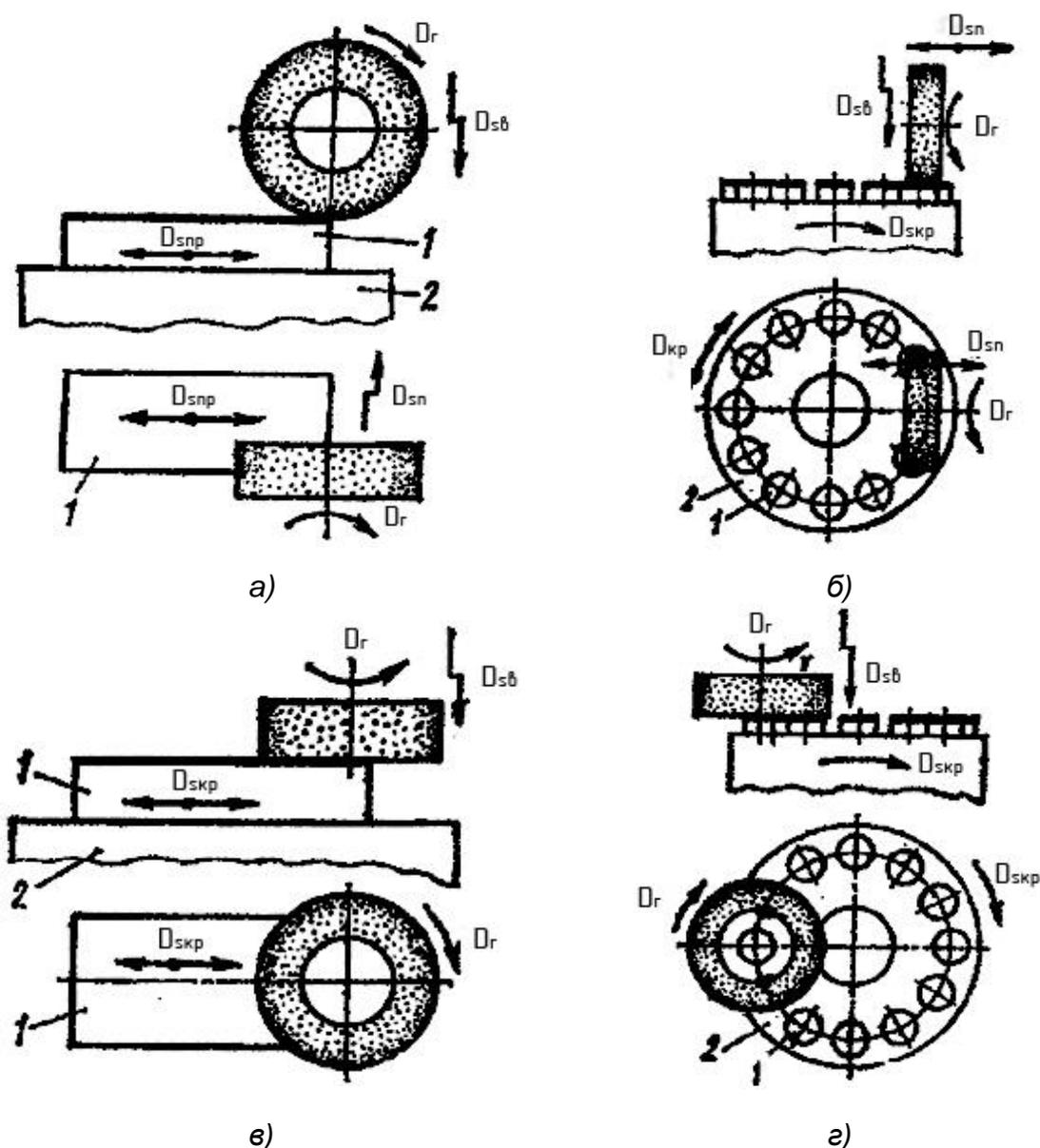


Рис. 10. Схемы обработки на плоскошлифовальных станках, работающих: а, б – периферией круга; в, г – торцом круга

Плоскошлифовальные станки **с вращающимся столом, работающие периферией круга** (рис. 10, б), применяются в серийном и массовом производстве для шлифования заготовок небольших размеров. Заготовки закрепляют на столе, чаще всего магнитом. Это дает возможность осуществлять зажим большой партии заготовок с небольшой толщиной. Здесь шлифовальный круг вращается и одновременно совершает возвратно-поступательное движение ( $D_{сп}$ ), а стол с заготовками вращается и одновременно при каждом двойном ходе.

Плоское шлифование торцом круга также может осуществляться на станках, подобных плоскошлифовальному с прямоугольным и круглым столом. Но в отличие от резания периферией круга при торцовом шлифовании одновременно участвует в процессе резания намного больше режущих абразивных зерен (большая площадь контакта). В этой связи при торцовом шлифовании выделяется существенно больше теплоты и возможен прижог и коробление тонких заготовок. Чтобы уменьшить выделение теплоты, часто используют чашечные круги, а в случае крупных заготовок – сегментные или кольцевые круги с меньшей площадью контакта.

Плоскошлифовальные станки с **продольно перемещающимся столом, работающие торцом круга** (рис. 10, в), применяются для шлифования заготовок больших размеров. Здесь продольная подача ( $D_{спр}$ ) сообщается столу, а поперечная ( $D_{сп}$ ) и вертикальная ( $D_{св}$ ) – кругу.

Плоскошлифовальные станки с **вращающимся столом, работающие торцом круга** (рис. 10, г), применяются для шлифования заготовок удобных для закрепления на магнитном столе. Здесь вертикальная подача ( $D_{св}$ ) осуществляется перемещениями круга в вертикальном направлении.

Способы установки и закрепление заготовок на плоскошлифовальных станках всех видов зависят от размеров, формы обрабатываемых заготовок и типа производства.

Закрепление заготовок на магнитной плите обеспечивает быстрый и надежный прижим заготовок, имеющих поверхность базирования. Отжим (снятие) заготовок так же прост, как и закрепление. Ос-

новным недостатком является невозможность закрепления немагнитных материалов.

В тех случаях, когда форма заготовки, технология обработки или свойства материала не позволяют закреплять заготовки на магнитных столах, применяют различные механические способы крепления: упоры, болты, штифты, тиски, закрепляемые на столе станка. При шлифовании немагнитных материалов используют вакуумные столы.

## 5.2. Обработка заготовок на круглошлифовальных станках

На круглошлифовальных станках наибольшее распространение получило шлифование в центрах. Для установки и зажима заготовок в станке используют центровые отверстия (у заготовок типа вала) и цилиндрические поверхности (для заготовок типа полого вала, втулки и т.п.).

На круглошлифовальных станках в зависимости от направления поступательного движения подачи различают четыре основных схемы шлифования (рис. 11).

При шлифовании *с продольным движением подачи* (рис. 11, а) заготовка вращается равномерно и совершает возвратно-поступательное движение. В конце каждого хода заготовки шлифовальный круг автоматически перемещается ( $D_{\text{сп}}$ ) на следующую глубину резания, пока не будет достигнут требуемый размер детали.

Высокой производительностью характеризуется **врезное шлифование** (рис. 11, б), применяемое при обработке жестких заготовок в тех случаях, когда ширина шлифуемой поверхности меньше ширины шлифовального круга. Заготовке сообщают только круговую подачу ( $D_{\text{скр}}$ ), а радиальная подача ( $D_{\text{сп}}$ ) круга, перпендикулярно оси вращения, обеспечивает непрерывность шлифования до заданного размера. При врезном шлифовании обрабатывают шейки коленчатых валов, плунжеры, фасонные поверхности, кольцевые канавки и т.п.

**Глубинное шлифование** (рис. 11, в) применяют при осуществлении предварительной обработки поверхности детали большой жесткости, что позволяет за один рабочий ход снять слой материала на всю необходимую глубину. На шлифовальном круге имеется кони-

ческий участок длиной 8–12 мм. В ходе шлифования конический участок удаляет основную часть срезаемого слоя, а цилиндрический участок зачищает (калибрует) обработанную поверхность. Поперечное движение подачи ( $D_{сп}$ ) отсутствует. Конструкция заготовки должна быть такой, чтобы было возможно шлифование данным методом.

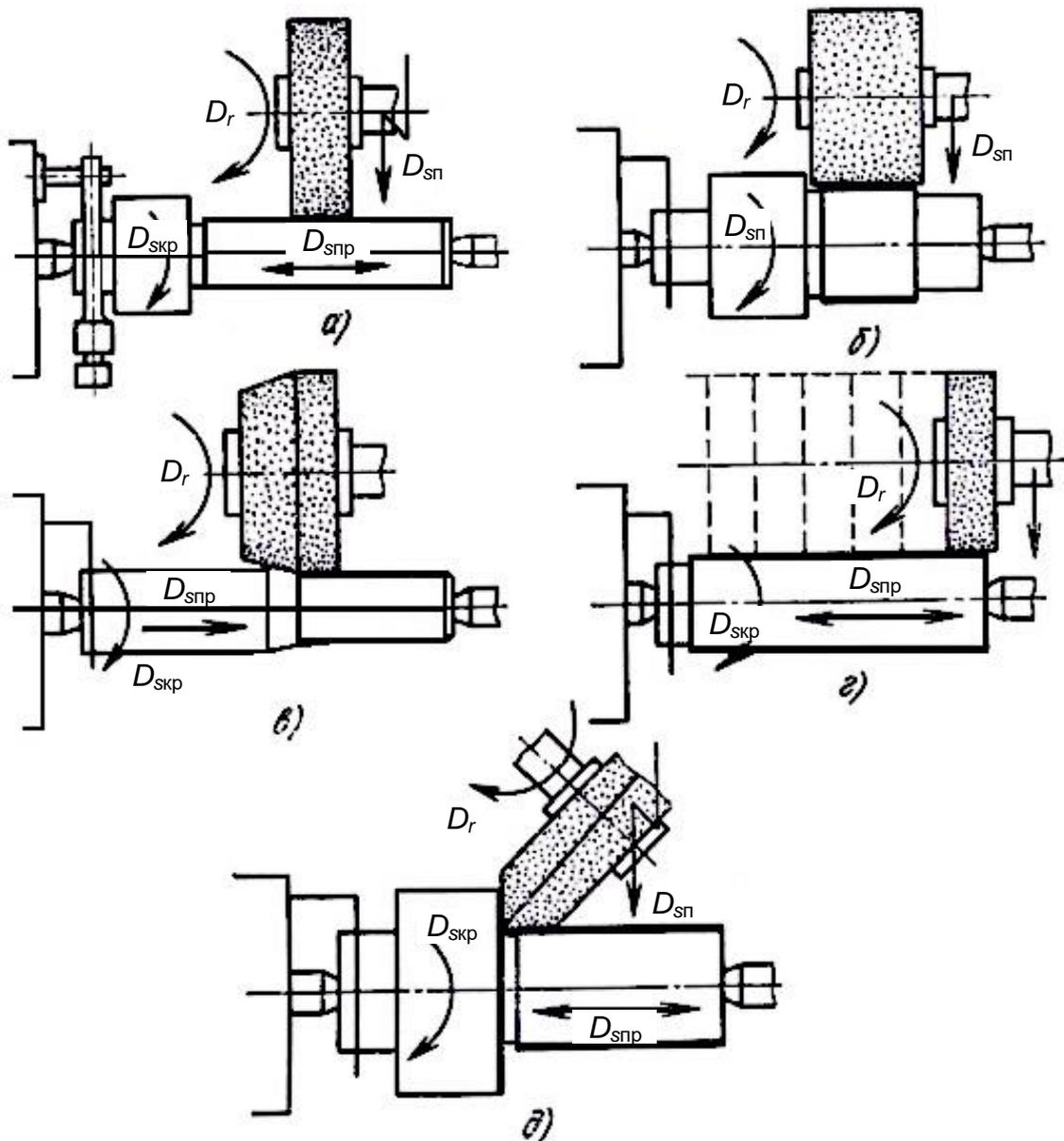


Рис. 11. Схемы обработки заготовки на круглошлифовальных станках

**Шлифование уступами** (рис. 11, г) сочетает две схемы шлифования: продольным проходом и врезания, как показаны на рис. 11, а, б, и применяется при обработке длинных деталей. На первом этапе производят шлифование врезанием с движением подачи ( $D_{сп}$ ), пере-

двигая периодически стол на 0,8–0,9 ширины круга (показано штриховыми линиями). На втором этапе делают несколько ходов с продольным движением подачи ( $D_{спр}$ ) для зачистки поверхности при выключенной поперечной подаче ( $D_{сп}$ ).

Для обеспечения правильного взаимного расположения цилиндрических и плоских (торцовых) поверхностей детали шлифовальный круг поворачивают на определенный угол (рис. 11, д). Шлифование производят коническими участками круга. Обработка цилиндрической поверхности осуществляется при периодическом движении поперечной подачи ( $D_{сп}$ ) на глубину резания аналогично схеме, приведенной на рис. 11, а. Обработка торцовой поверхности производится с движением продольной подачи ( $D_{спр}$ ) при плавном подводе вручную заготовки к кругу или с помощью программного устройства.

### 5.3. Обработка заготовок на внутришлифовальных станках

Внутреннее шлифование применяют для получения отверстий высокой точности с малой шероховатостью поверхности в заготовках, как правило, прошедших термическую обработку. Можно шлифовать сквозные, глухие, фасонные и конические отверстия. Диаметр шлифовального круга составляет 0,7...0,9 диаметра шлифуемого отверстия. Чем меньше диаметр круга, тем больше его частота вращения.

Основную схему внутреннего шлифования можно реализовать двумя способами (рис. 12).

При шлифовании отверстий способом продольных ходов (рис. 12, а) абразивному кругу сообщают главное движение резания ( $D_r$ ) и движение продольной подачи ( $D_{спр}$ ) для обработки отверстий по всей длине, а также движение шаговой радиальной подачи ( $D_{сп}$ ) для послойного удаления припуска во время каждого продольного хода круга. Заготовке сообщают вращение ( $D_{скр}$  – круговая подача) для обработки отверстий по всей его окружности.

При шлифовании отверстий в заготовках больших размеров используют способ планетарного шлифования (рис. 12, б), при котором заготовку неподвижно закрепляют на столе станка. Шлифующий круг

( $D_r$ ) вращается не только вокруг своей оси, но и вокруг оси отверстия ( $D_{спл}$ ), т.е. совершает планетарное движение. Периодически круг перемещается в радиальном направлении на глубину резания ( $D_{st}$ ). В случае планетарного шлифования возможна обработка внутренних фасонных и торцовых поверхностей, а также обработка отверстий, например, в деталях типа корпусов.

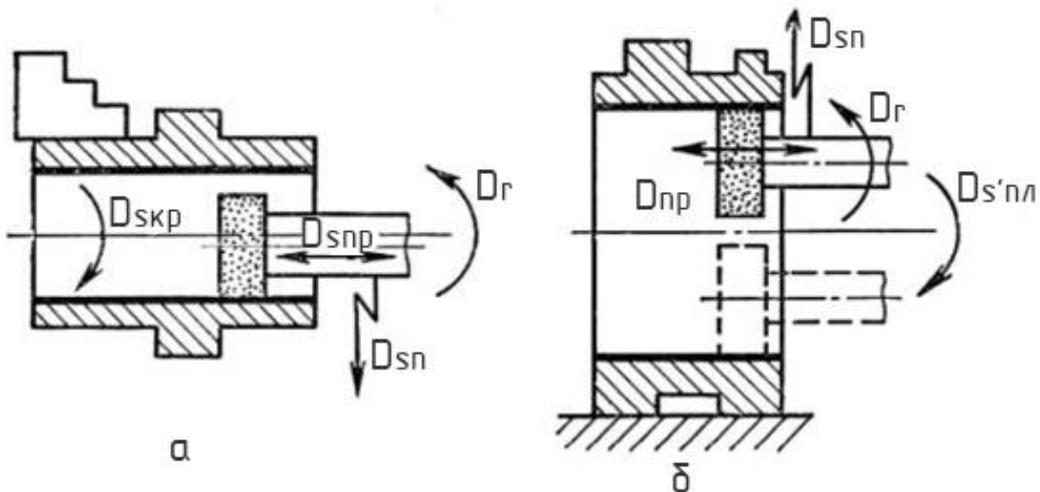


Рис. 12. Схема обработки заготовки на внутришлифовальных станках

#### 5.4. Обработка заготовок на бесцентрово-шлифовальных станках

Существенно повысить производительность процесса шлифования заготовок, вследствие ужесточения режима резания и автоматизации станков, позволяет бесцентровое шлифование. Сущность бесцентрового шлифования заключается в том, что заготовка в процессе обработки не закрепляется в центрах и других зажимных приспособлениях, а базируется на опорном ноже станка и ведущем круге. Таким образом, возможно шлифование большими партиями не только заготовок типа колец, гильз, но и заготовок, имеющих большую длину и малый диаметр.

Принцип бесцентрового шлифования состоит в следующем (рис. 13). Два абразивных круга вращаются в одном направлении с разными скоростями: круг 3 является шлифующим, а круг 4 – ведущим; шлифуемая заготовка 1 лежит между кругами, опираясь на

нож 2. Ведущий круг, имеющий меньшую окружную скорость  $V_2 = 10 \dots 50$  м/мин, сообщает обрабатываемой заготовке вращение (круговую подачу), а шлифующий круг, которому сообщается бóльшая скорость  $V_1 = 3 \dots 40$  м/с, производит обработку заготовки.

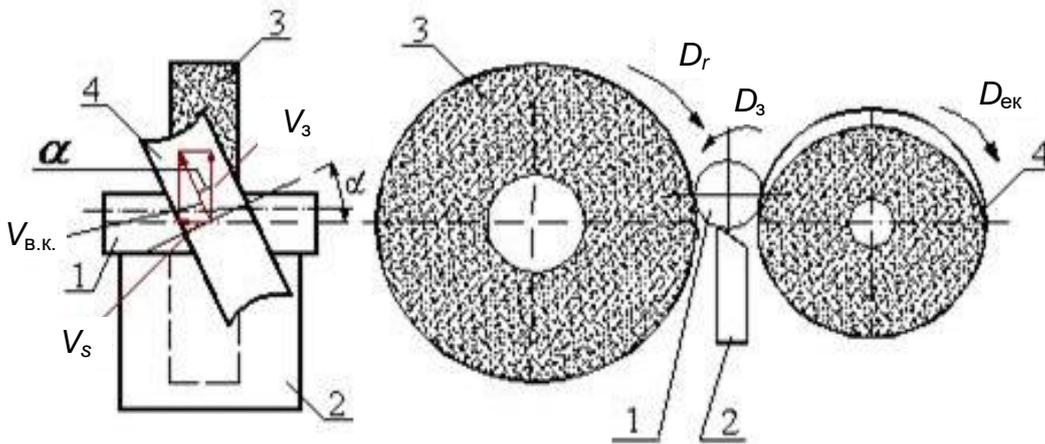


Рис. 13. Схема наружного бесцентрового шлифования

Для осуществления процесса шлифования необходимо, чтобы сила трения между ведущим кругом и заготовкой была больше силы шлифования. Вследствие этого заготовка вращается со скоростью, близкой к окружной скорости ведущего круга. Перед шлифованием ведущий круг устанавливают наклонно под углом  $\alpha = 1 \dots 7^\circ$  к оси вращения заготовки. Чем больше угол  $\alpha$ , тем больше подача. Вектор скорости при движении этого круга можно разложить на составляющие. При этом происходит движение продольной подачи. Со скоростью заготовка перемещается по ножу вдоль оси и может быть отшлифована по всей длине. При участии продольной подачи, заготовка постепенно выходит из рабочей зоны станка, освобождая место для следующей заготовки.

При выполнении на станках бесцентрового шлифования внутренних отверстий обрабатываемая деталь 1 устанавливается между опорными роликами 2, 3 и ведущим кругом 4 и сжимается ими с определенной силой (рис. 14). Ведущий и шлифующий круг вращаются в разных направлениях с различными скоростями. Шлифующий круг 5 помимо вращения получает радиальную подачу и возвратно-поступательное движение.

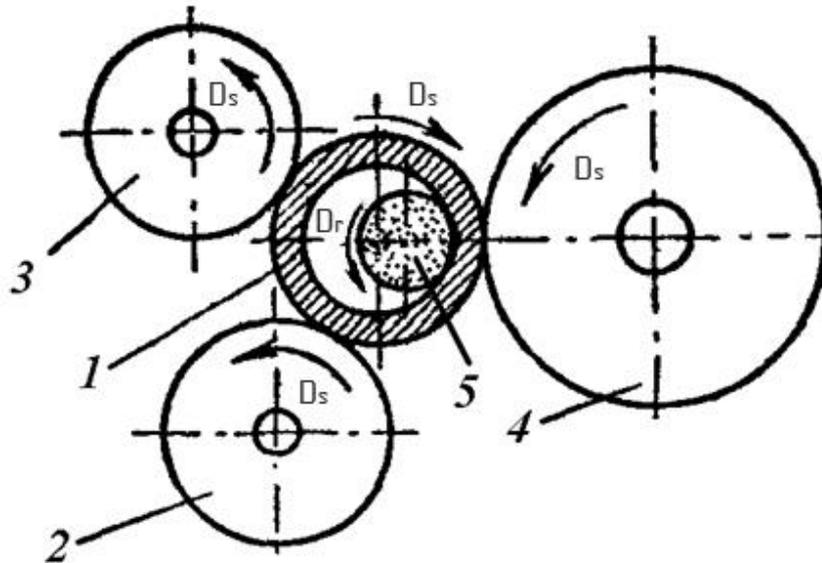


Рис. 14. Схема внутреннего бесцентрового шлифования

Бесцентровое внутреннее шлифование более производительно, чем обычное внутреннее шлифование, и обеспечивает большую точность, так как жесткость бесцентрово-шлифовальных станков выше.

Бесцентровое внутреннее шлифование рекомендуется производить с максимально допустимой скоростью круга, так как с уменьшением скорости и диаметра круга, а также с увеличением числа оборотов ведущего ролика, копирование дефектов наружной поверхности деталей увеличивается. Поэтому точность отверстий на внутришлифовальных бесцентровых станках в значительной мере зависит от точности и качества наружной поверхности обрабатываемой детали.

### 5.5. Шлифование резьбы и зубчатых колес

Основные методы шлифования резьбовых и зубчатых поверхностей подобны тем, которые используются при изготовлении резьбы и зубчатых колес лезвийными инструментами.

При шлифовании резьбы:

- форма режущей поверхности абразивного круга должна соответствовать форме поперечного сечения резьбовой канавки на заготовке;
- за один полный оборот заготовки абразивный круг должен переместиться вдоль оси резьбовой поверхности на шаг резьбы;

– ось абразивного круга должна быть повернута относительно оси заготовки на угол подъема резьбовой канавки.

На рисунке 15, а показан способ шлифования метрической резьбы многониточным кругом, на рис. 15, б – трапецеидальной резьбы однониточным кругом.

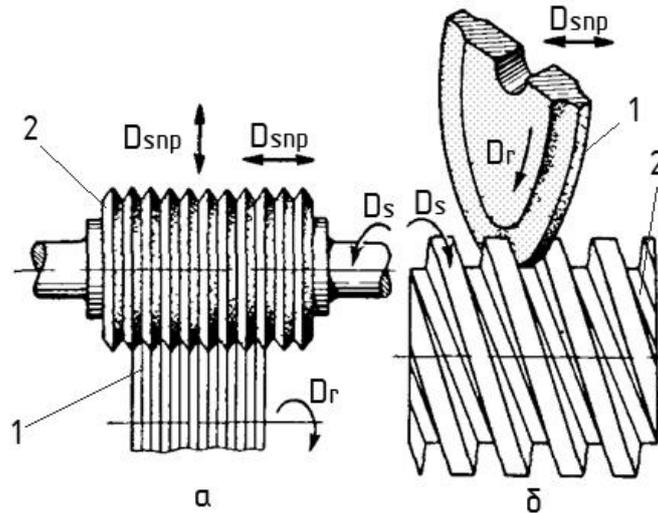


Рис. 15. Схемы наружного шлифования резьбовых поверхностей

При шлифовании зубчатых колес используют метод копирования или метод обкатки (рис. 16).

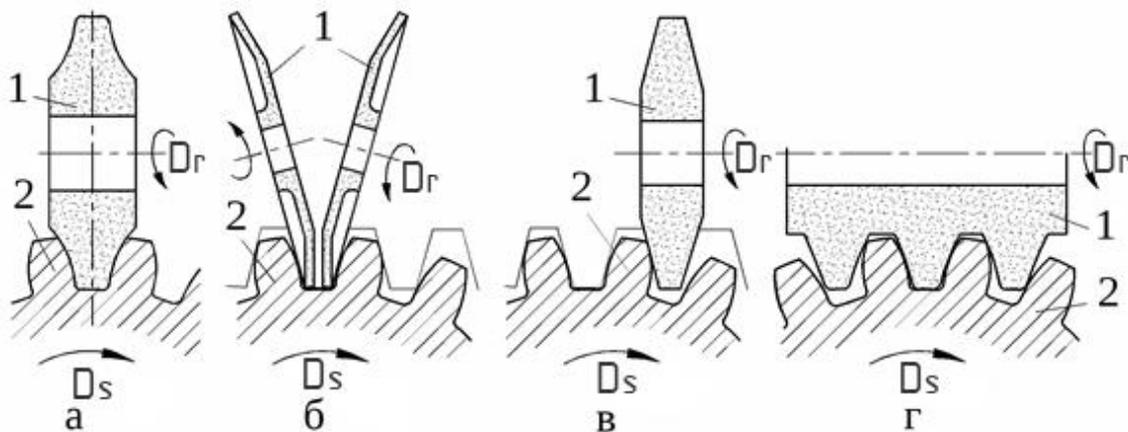


Рис. 16. Схемы зубошлифования: а – методом копирования; б – методом обкатывания двумя кругами; в – методом обкатывания одним кругом; г – методом обкатывания зубчатой рейкой

Зубошлифование по методу копирования (рис. 16, а) выполняют фасонными шлифовальными кругами, имеющими профиль, соответствующий профилю впадины между зубьями колеса, который образу-

ется путем правки специальными приспособлениями. При этом методе шлифовальному кругу сообщают вращательное и возвратно-поступательное движение вдоль образующей зуба. Подачу на глубину шлифования выполняют периодически на каждый двойной ход круга. После обработки каждой впадины зуба осуществляют поворот колеса на заданный угол и производят правку шлифовального круга по шаблону.

Этот метод используется при шлифовании зубчатых колес с прямым зубом, так как любое изменение параметров зубчатых колес (числа зубьев, модуля, угла наклона и т.д.) представляет большие трудности при профилировании шлифовального круга.

*Зубошлифование методом обкатывания* осуществляет в двух вариантах: двумя шлифовальными кругами и двухсторонним коническим кругом.

При шлифовании двумя шлифовальными кругами (рис. 16, б) каждый круг обрабатывает одну боковую сторону зуба колеса. При этом шлифовальные круги тарельчатой формы получают вращательное и возвратно-поступательное движение вдоль образующей зуба. Зубчатое колесо вращается вокруг своей оси в одном направлении и одновременно прямолинейно перемещается так, что колесо как бы катится по «воображаемому» контуру рейки. За один цикл окончательно шлифуется впадина зуба по обеим сторонам, после чего шлифовальные круги выводятся из впадины и зубчатое колесо осуществляет делительное перемещение на один зуб.

Шлифовальные круги тарельчатой формы, работая узкой кромкой, имеют малую поверхность контакта с поверхностью шлифуемого зуба, что при сочетании обкатного движения и продольной подачи колеса приводит к быстрой смене мест контакта края круга со шлифованной поверхностью. При этом зуб конического колеса незначительно нагревается и круг почти не «засаливается».

Этот метод позволяет изготавливать зубчатые колеса с высокой точностью, но он (метод) недостаточно производителен и требует повышенной стоимости технологической оснастки.

Шлифование двухсторонним коническим кругом (рис. 16, в) заключается в последовательной обработке обеих сторон впадины

между зубьями. Движение обкатки состоит из возвратно-вращательного движения обрабатываемого колеса вокруг своей оси и продольного его перемещения от центра. Профиль зубьев обрабатываемого колеса 2 как бы обкатывается по профилю шлифовального круга 1. Метод обладает высокой производительностью и широко используется при изготовлении зубчатых колес.

На рисунке 16, г показан способ шлифования, имитирующий зацепление зубчатой рейки 1 с зубчатым колесом 2. Зубчатая рейка состоит из набора абразивных кругов. Режущая поверхность круга в поперечном сечении имеет форму равнобокой трапеции с размерами, соответствующими профилю обрабатываемого зубчатого колеса. Движение деления является непрерывным и согласуется с обкаточным вращательным движением зубчатого колеса и поступательным движением зубчатой рейки в осевом направлении. Метод обкатки зубчатой рейкой обладает высокой производительностью благодаря непрерывности процесса деления.

## 6. ШЛИФОВАЛЬНЫЕ СТАНКИ

Шлифовальные станки подразделяются на ряд типов, из которых наиболее распространены следующие: *плоскошлифовальные* – для обработки различных плоскостей; *круглошлифовальные* – для обработки заготовок, имеющих ось вращения по наружной поверхности; *внутришлифовальные* – для обработки внутренних отверстий заготовок; *бесцентрово-шлифовальные* – для обработки наружных и внутренних поверхностей тел вращения.

**Плоскошлифовальные станки.** Шлифование плоских поверхностей на плоскошлифовальных станках с прямоугольным столом (рис. 17) производится периферией круга. Движение подачи производится в крайних положениях стола 3. На столе может быть установлена магнитная плита, тиски или другое зажимное приспособление для установки и закрепления обрабатываемой заготовки. Продольное (возвратно-поступательное) движение стола по станине 4 осуществляется с помощью гидравлического устройства (привод 5), состоящего

из поршня, цилиндров и органов управления, смонтированного внутри стола. Шлифовальная головка 1 перемещается вертикально по направляющим стойки 2.

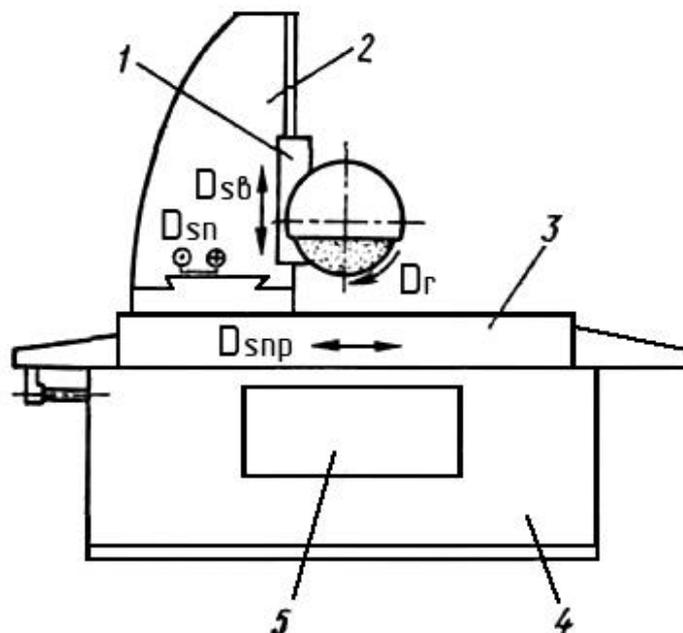


Рис. 17. Плоскошлифовальный станок с прямоугольным столом

**Круглошлифовальные станки.** Круглошлифовальные станки (рис. 18) можно разделить на: простые, универсальные и врезные. Универсальный круглошлифовальный станок состоит из станины 1, стола 2, передней бабки 3 с коробкой скоростей, шлифовальной бабки 4, задней бабки 5, привода стола 6.

Для перемещения узлов круглошлифовальных станков широко используют гидравлические устройства (привод 6). Возвратно-поступательное перемещение стола 2 для движения продольной подачи производят с помощью гидроцилиндров и поршня. Движения круговой подачи  $D_{спр}$  заготовки обеспечивает специальный электродвигатель. Вращение шлифовального круга осуществляется с помощью клиноременной передачи.

Наибольшее распространение получили методы шлифования в центрах. Для повышения точности обработки центры устанавливают неподвижно. Круглое шлифование цилиндрических поверхностей может быть выполнено по одной из четырех схем показанных на рис. 11.

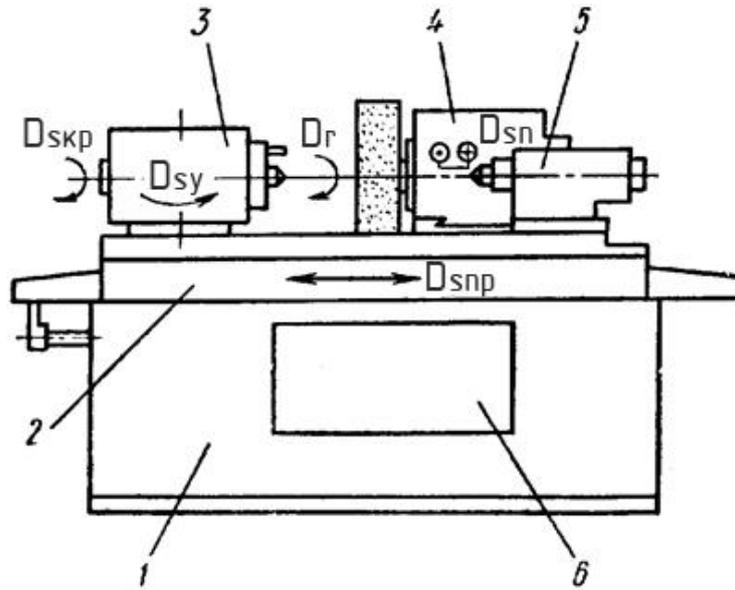


Рис. 18. Круглошлифовальный станок

Простые станки снабжают неповоротными бабками. У резных станков отсутствует продольное движение подачи стола, а шлифование ведется по всей длине заготовки.

**Внутришлифовальные станки.** Шлифование отверстий в заготовках (телах вращения) выполняют на внутришлифовальных станках (рис. 19). На станине 1 установлена бабка 2 изделия. С помощью патрона 3 на ее шпинделе закрепляют заготовку и сообщают ей вращательное движение ( $D_{скр}$ ).

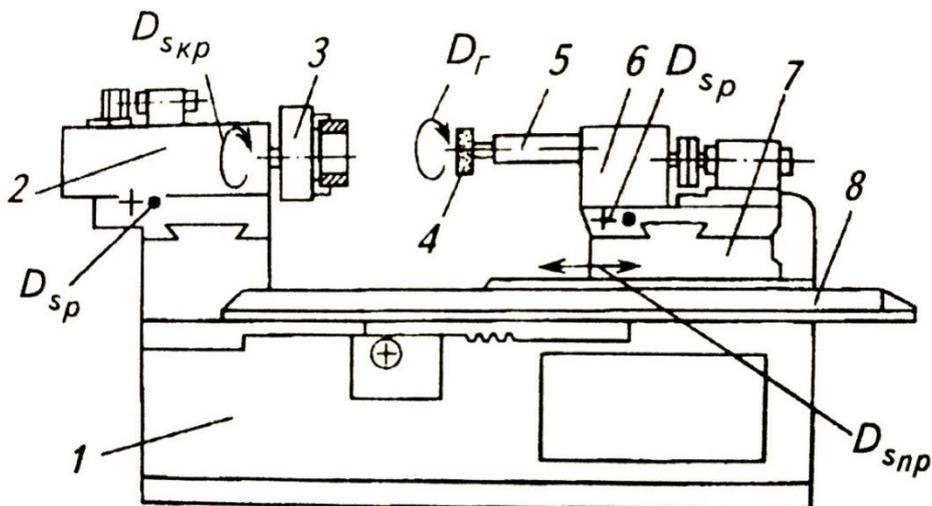


Рис. 19. Внутришлифовальный станок

Главное движение резания ( $D_r$ ) сообщают шпинделю 5 с абразивным кругом 4 от высокооборотного электродвигателя. Движение

радиальной подачи ( $D_{sp}$ ) могут выполнять: шпиндельная головка 6 с абразивным кругом, смонтированная на поперечных направляющих 7. Либо бабка 2 изделия. Движение продольной подачи ( $D_{спр}$ ) совершает шлифовальная бабка 6 вместе со столом 8. Внутри станины 1 смонтирован гидропривод для создания и регулирования скоростей движений подач  $D_{sp}$  и  $D_{спр}$  в автоматическом режиме.

**Бесцентрово-шлифовальные станки.** Для наружного, и в меньшей степени – для внутреннего, круглого шлифования в крупносерийном и массовом производствах широко применяют бесцентрово-шлифовальные станки.

Процесс шлифования на данных станках характеризуется высокой производительностью, благодаря резкому уменьшению вспомогательного времени. Заготовки обрабатывают в незакрепленном состоянии, и для них не требуется центровых отверстий, что допускает большую глубину шлифования на проход, а также позволяет шлифовать заготовки очень малого диаметра.

На станине 1 бесцентрово-шлифовального станка (рис. 20) установлены два круга: шлифующий – на бабке 2 и ведущий – на бабке 4. Каждый из кругов подвергается периодически правке с помощью механизмов 3 и 5. Заготовка вращается на ноже 6 и одновременно контактирует с общими кругами. Чтобы заготовка перемещалась по ножу с движением продольной подачи, бабку ведущего круга поворачивают на небольшой угол  $\alpha$ , показанный на рис. 13.

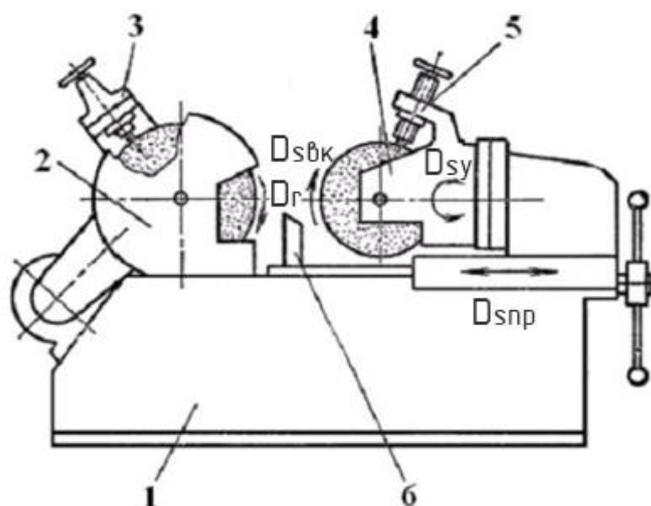


Рис. 20. Бесцентрово-шлифовальный станок

## 7. ПОРЯДОК РАСЧЕТА РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

В соответствии с вариантом задания (с. 42), выбираем шлифовальный круг и рисуем схему обработки (рис. 21).

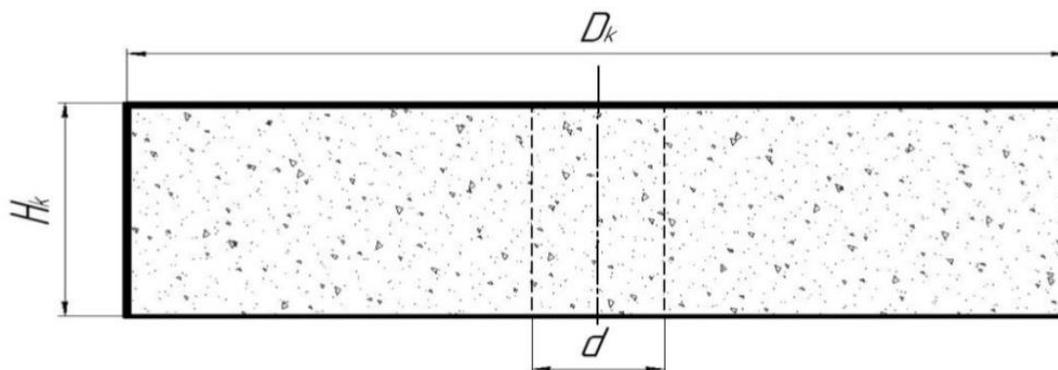


Рис. 21. Шлифовальный круг тип ПП

### 7.1. Выбор шлифовального круга

Выбор шлифовального круга заключается в выборе его типа, геометрических размеров и характеристик. Тип шлифовального круга и его геометрические размеры определяются конструктивными особенностями и габаритными размерами детали станка.

При круглом наружном шлифовании в центрах методом «напроход» обычно используют шлифовальные круги типа ПП (плоские прямого профиля) небольшого размера, что позволяет увеличить их стойкость и производительность обработки (рис. 21).

Рекомендации по выбору геометрических размеров шлифовальных кругов общего назначения даны в табл. 2.

Таблица 2

Размеры шлифовальных кругов в зависимости от размеров заготовки (мм)

$l_1$	$D$	30...35	36...40	41...45	46...50
60...90	$D_k$	200	220	240	260
	$H_k$	8	10	12	16
	$d_k$	32	32	32	32
90...160	$D_k$	200	220	240	260
	$H_k$	12	16	18	20
	$d_k$	32	32	32	32

Основными характеристиками шлифовальных кругов являются:

– абразивный материал, его зернистость и содержание в круге зерен основной фракции;

– вид связки;

– структура абразивного круга;

– твердость абразивного круга;

– классы точности;

– классы неуравновешенности;<sup>3</sup>

– допускаемая рабочая скорость шлифования.

Обозначения характеристик шлифовальных кругов показаны на рис. 22.

Выбор характеристик шлифовальных кругов производится по справочным данным в зависимости от вида шлифования и сплава заготовки.

Рекомендации по выбору характеристик шлифовальных кругов для шлифования заготовок из сталей даны в табл. 3.

При предварительном шлифовании заготовок качественных и конструкционных углеродистых сталей, а также низколегированных и среднелегированных сталей рекомендуется использовать круги из белого электрокорунда, который имеет более высокую режущую способность, чем нормальный электрокорунд.

При окончательном шлифовании заготовок из указанных сплавов целесообразно использовать круги из монокорундов, обеспечивающие стойкость в 1,2...2 раза выше, чем круги из белого электрокорунда.

Зернистость абразивных материалов для предварительного шлифования необходимо выбирать среднюю от 40 до 50, а для окончательного шлифования мелкую от 10 до 12. Содержание основной фракции зерен в шлифовальных кругах должно быть от 40 до 45%.

В качестве связки в данных условиях целесообразно использовать керамическую, так как круги на керамической связке обеспечивают стабильность режимов шлифования и могут работать с любыми СОЖ.

---

<sup>3</sup> Класс неуравновешенности шлифовального круга характеризует неуравновешенность массы круга, которая зависит от точности геометрической формы, равномерности размещения абразивной массы, качества прессования и термообработки инструмента в процессе его изготовления.

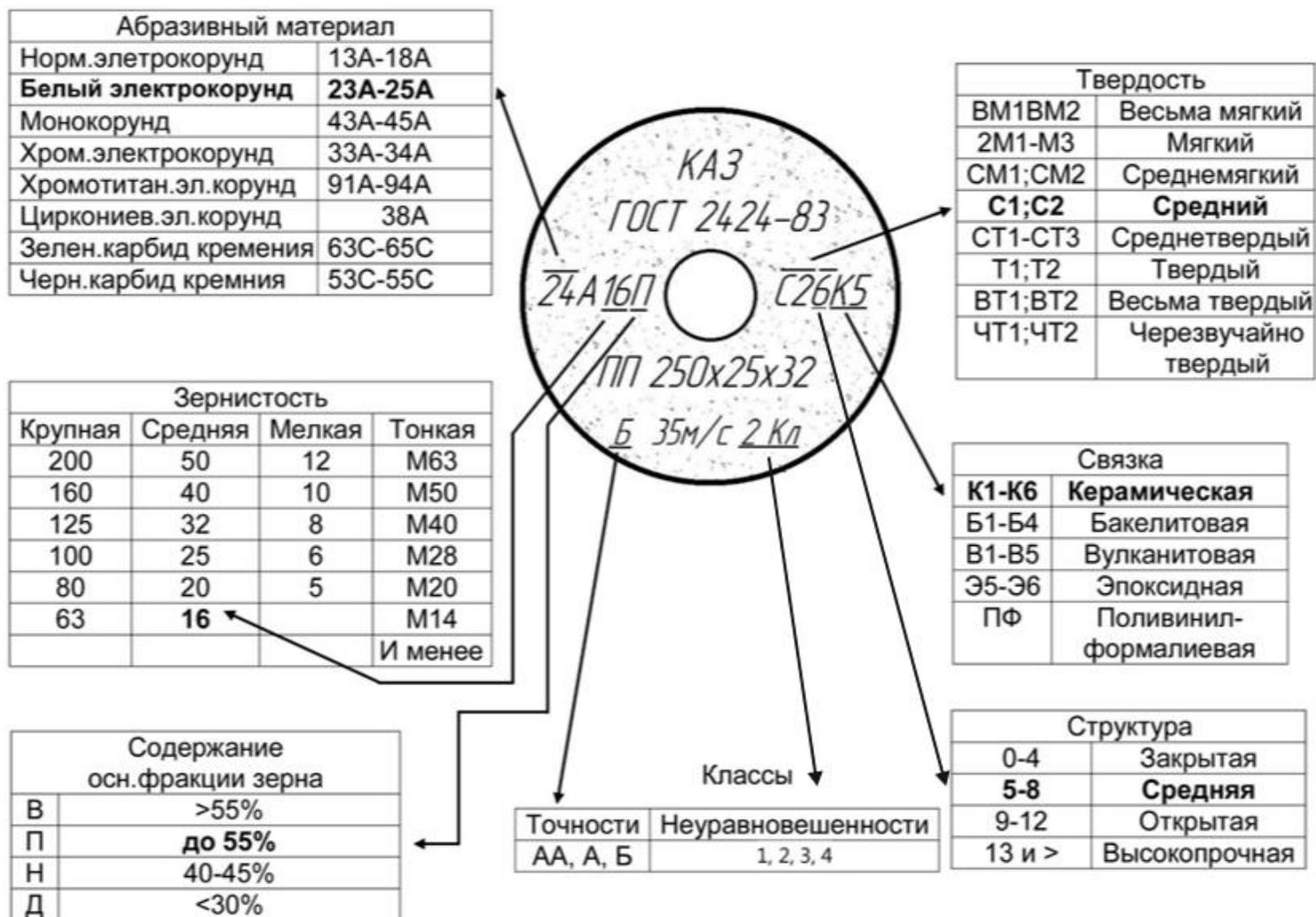


Рис. 22. Обозначения характеристик шлифовального круга

Таблица 3

## Рекомендации по выбору характеристик шлифовальных кругов

Материал заготовки	Термообработка	Вид шлифования	Абразивные материалы	Зернистость	Твердость
Качественные углеродистые стали	Незакаленные HRC 15–20	Предварительное $R_a = 1$ мкм	Белый электрокорунд 23А–25А	Средняя 40–50	Мягкая М1–М3
	Закаленные HRC 20–40	Окончательное $R_a = 0,5$ мкм	Монокорунд 43А–45А	Мелкая 10–12	Средняя С1; С2
Конструкционные стали	Закаленные HRC 40–60	Окончательное $R_a = 0,5$ мкм	Монокорунд 43А–45А	Мелкая 10–12	Мягкая М1–М3
Низколегированные стали	Закаленные HRC 40–60	Предварительное $R_a = 1$ мкм	Белый электрокорунд 23А–25А	Средняя 40–50	Мягкая М1–М3
Среднелегированные стали	Закаленные HRC 40–60	Окончательное $R_a = 0,5$ мкм	Монокорунд 43А–45А	Мелкая 10–12	Мягкая М1–М3
Для всех вариантов					
Содержание основной фракции	Связка	Структура	Класс точности	Класс неуравновешенности	Допустимая скорость шлифования
Н (40–45%)	Керамическая К1–К6	Средняя 5–8	А	2	$V_{\text{доп}} = 35$ м/с

Структура круга обычно выбирается средняя.

Твердость круга для закаленных заготовок – мягкая, а для незакаленных заготовок – средняя.

Для рассматриваемой задачи применяем класс точности кругов – А, класс неуравновешенности – 2 и допустимую скорость шлифования  $V = 35$  м/с.

## 7.2. Последовательность расчета режима шлифования

Схема обработки для расчетов показана на рис. 23.

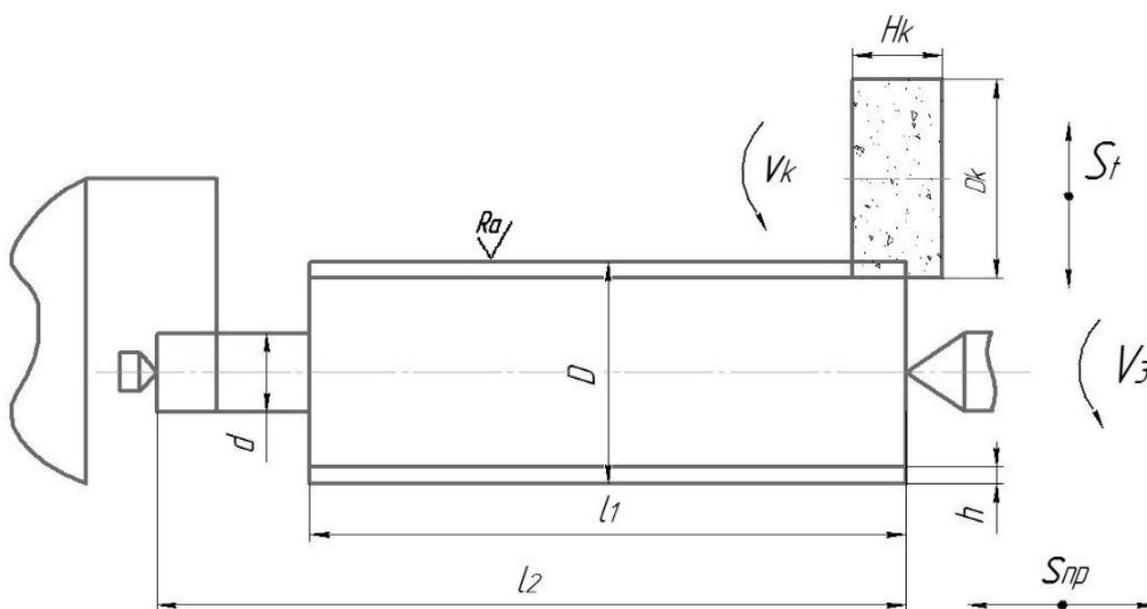


Рис. 23. Схема обработки

7.2.1. Назначаем скорость вращения заготовки  $V_3$  (табл. П1).

7.2.2. Определяем частоту вращения заготовки  $n_3$ :

$$n_3 = \frac{1000 \cdot V_3}{\pi \cdot D_3}.$$

7.2.3. Проверяем, может ли эта частота быть установлена на станке (табл. П5). При необходимости изменяем  $V_3$ .

7.2.4. Назначаем величину продольной подачи круга:

$$S_{пр} = (0,25 \dots 0,30) \cdot H_k, \text{ мм/об.}$$

7.2.5. Рассчитываем величину минутной продольной подачи:

$$S_m = S_{пр} \cdot n_3, \text{ мм/мин.}$$

**7.2.6.** Проверяем, может ли эта подача быть установлена на станке (табл. П5).

**7.2.7.** Определяем величину радиальной подачи на двойной ход стола  $S_t$  (табл. П2 и П3):

$$S_t = S_i^T \cdot K_{si},$$

$$K_{si} = K_M \cdot K_D \cdot K_{V_k} \cdot K_h,$$

где  $K_M$  – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала;  $K_D$  – коэффициент, учитывающий диаметр шлифовального круга;  $K_{V_k}$  – коэффициент, учитывающий скорость шлифовального круга;  $K_h$  – коэффициент, учитывающий величину припуска.

**7.2.8.** Из паспортных данных станка выбираем максимально возможную частоту вращения шлифовального круга  $n_k$  (табл. П5).

**7.2.9.** Вычисляем скорость вращения шлифовального круга:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n_k}{1000 \cdot 60}, \text{ м/с.}$$

**7.2.10.** Проверяем условие:

$$V_k \leq V_k^{\text{доп}} \quad (V_k^{\text{доп}} = 35 \text{ м/с}).$$

**7.2.11.** Определяем технологическое время:

$$T_o = \frac{(l_1 + H_k) \cdot h}{S_M \cdot S_t} \cdot K_{\text{вых}},$$

где  $K_{\text{вых}}$  – коэффициент «выхаживания», т.е. шлифования без радиальной подачи, которое осуществляется на заключительном этапе операции для достижения требуемых точностей и шероховатостей. При предварительном шлифовании  $K_{\text{вых}} \approx 1,2$ , а при окончательном  $K_{\text{вых}} \approx 1,4$ .

### 7.3. Порядок выполнения практической работы

**7.3.1.** Получить у преподавателя номер варианта работы.

**7.3.2.** Выбрать по табл. 2 и 3 шлифовальный круг.

**7.3.3.** Нарисовать его эскиз и обозначить его в соответствии с рис. 22.

**7.3.4.** Нарисовать схему обработки по своему варианту с размерами и обозначением движения (рис. 23).

**7.3.5.** Рассчитать параметры шлифования.

**7.3.6.** Сдать отчет по работе преподавателю.

## 8. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

### Вариант 1

#### Исходные данные

На круглошлифовальном станке 3М131 в центрах способом продольной подачи шлифуется ступенчатый вал с диаметрами  $D = 48$  мм и  $d = 30$  мм. Шлифуется длина вала  $l_1 = 84$  мм, а общая длина  $l_2 = 130$  мм. Технологические требования к шлифуемому участку:  $R_a = 0,5$  мкм (окончательная обработка) припуск на обработку  $h = 0,1$  мм.

Необходимо нарисовать эскиз обработки, выбрать шлифовальный круг, рассчитать режимы резания, определить основное технологическое время.

#### 8.1. Выбор шлифовального круга.

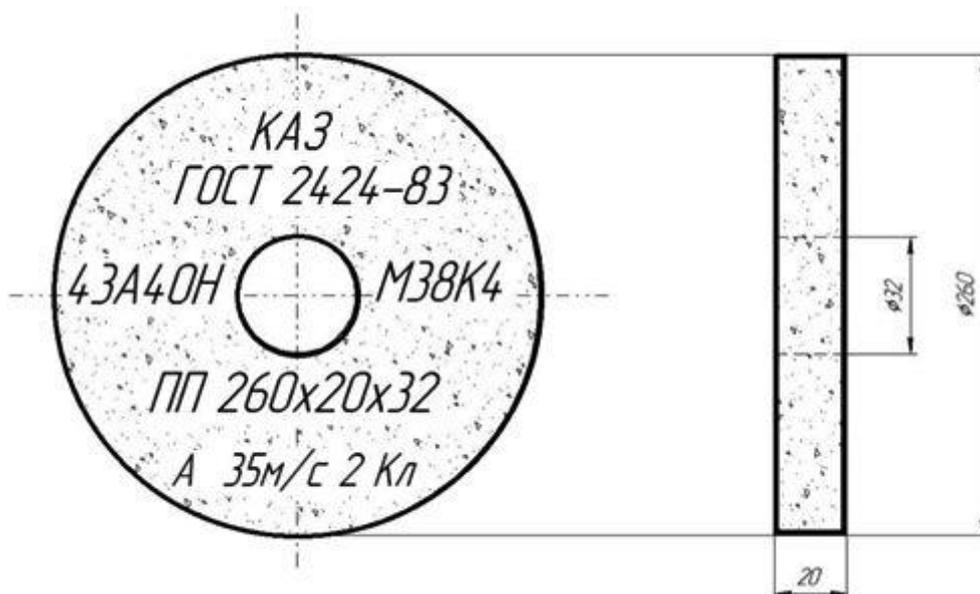
По таблице 1:

$D_k = 260$  мм;  $H_k = 20$  мм;  $d_k = 32$  мм.

По таблице 2:

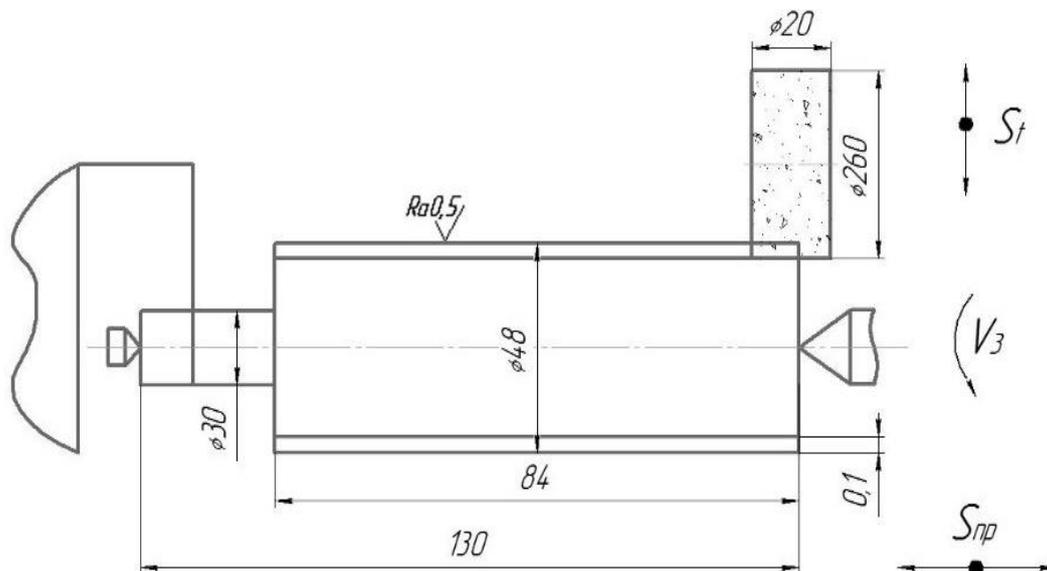
Абразивный материал – монокорунд 43А. Зернистость – средняя 40. Содержание основной фракции – Н. Связка – керамическая К4. Структура – средняя 8. Твердость – мягкая М3. Класс точности – А. Класс неуравновешенности – 2. Допустимая скорость шлифования  $V_k^{доп} = 35$  м/с.

#### 8.2. Эскиз шлифовального круга с обозначениями.



### 8.3. Последовательность расчета режима шлифования.

Схема обработки для расчетов.



Назначаем скорость вращения заготовки  $V_3$  (табл. 3):

$$V_3 = 30 \text{ м/мин.}$$

Определяем частоту вращения заготовки  $n_3$ :

$$n_3 = \frac{1000 \cdot V_3}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 30}{3,14 \cdot 48} = 200 \frac{\text{об}}{\text{мин.}}$$

Исходя из характеристик станка, принимаем:  $n_3 = 200$  об/мин.

Назначаем величину продольной подачи круга:

$$S_{\text{пр}} = 0,3 \cdot H_k = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ мм/об.}$$

Рассчитываем величину минутной продольной подачи:

$$S_M = S_{\text{пр}} \cdot n_3 = 6 \cdot 200 = 1200 \text{ мм/мин.}$$

Исходя из характеристик станка, принимаем:  $S_M = 1200$  мм/мин.

Определяем величину радиальной подачи на двойной ход стола (табл. П2, П3):

$$S_t = S_i^T \cdot K_M \cdot K_D \cdot K_{V_k} \cdot K_h = 0,007 \cdot 1,0 \cdot 0,42 \cdot 1,0 \cdot 0,7 = 0,002 \frac{\text{мм}}{\text{двойной ход.}}$$

Из паспортных данных станка (табл. П5) выбираем максимальную частоту вращения шлифовального круга:

$$n_k = 1285 \text{ об/мин.}$$

Вычисляем скорость вращения шлифовального круга:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n_k}{1000 \cdot 60} = \frac{3,14 \cdot 260 \cdot 1285}{1000 \cdot 60} = 17,5 \text{ м/с.}$$

Проверяем условие  $V_k \leq V_k^{\text{доп}}$ .

Определяем основное технологическое время:

$$T_o = \frac{(l_1 + H_k) \cdot h}{S_m \cdot S_t} K_{\text{вых}} = \frac{(84 + 20) \cdot 0,1}{1200 \cdot 0,002} \cdot 1,4 = 6 \text{ мин.}$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под главным движением при шлифовании?
2. Какими свойствами должны обладать абразивные материалы?
3. По каким признакам различают абразивные материалы?
4. Что понимается под зернистостью абразивных материалов?
5. Что понимается под твердостью шлифовальных кругов?
6. Что такое неуравновешенность шлифовальных кругов?
7. Из каких основных элементов состоит абразивный круг?
8. Чем характеризуется структура абразивного инструмента?
9. Какие классы точности вы знаете?
10. Какие методы существуют при зубошлифовании?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология конструкционных материалов: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский [и др.]. – 6-е изд. – М.: Машиностроение, 2005. – 592 с.
2. Нефедов, Н.А. Сборник задач и примеров по резанию металлов и режущему инструменту / Н.А. Нефедов, К.А. Осипов. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
3. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / В.И. Баранников [и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 373 с.

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

На круглошлифовальном станке 3М131 способом продольной подачи («напроход») шлифуется ступенчатый вал с диаметром  $D$  и  $d$ , длиной  $l_1$ . Общая длина вала  $l_2$ . Технологические требования к шлифуемому участку: параметр шероховатости  $R_a$ , припуск на сторону  $h$ , способ крепления заготовки в станках – в центрах.

№ варианта	Материал заготовки	Вид шлифования	$R_a$ , мкм	Размеры в мм				
				$D$	$d$	$l_1$	$l_2$	$h$
1	Качественная углеродистая сталь 40, незакаленная HRC 18	Предварительное	1	30	20	70	100	0,2
2						80	120	
3						90	120	
4						100	120	
5						120	140	
6	Качественная углеродистая сталь 45, закаленная HRC 40	Окончательное	0,5	32	24	80	100	0,1
7						86	120	
8						90	100	
9						96	120	
10				100	140			
11	Конструкционная углеродистая сталь У7А, закаленная HRC 60	Окончательное	0,5	40	30	70	100	0,1
12						80	120	
13						90	126	
14						100	130	
15				120	140			
16	Низколегированная сталь 40Х, закаленная HRC 50	Предварительное	1	40	20	70	90	0,2
17						80	100	
18						90	110	
19						100	120	
20				120	140			
21	Среднелегированная Сталь 40ХНМА, закаленная HRC 55	Окончательное	0,5	32	30	70	90	0,1
22						80	100	
23						90	110	
24						100	120	
25						120	140	
26	Среднелегированная сталь 40ХН, закаленная HRC 42	Окончательное	0,5	40	30	60	100	0,1
27						64	110	
28						72	120	
29						78	120	
30						84	130	

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Скорость при шлифовании цилиндрических поверхностей ( $V_3$ , м/мин)

Диаметр заготовки $D_3$ , мм	Вид шлифовки	
	предварительное	окончательное
$D \leq 30$	14	17
$30 < D \leq 40$	17	21
$40 < D \leq 50$	26	32

Таблица П2

Радиальная подача  $S_r$ , мм/двойной ход, при шлифовании цилиндрических поверхностей на проход

Диаметр заготовки $D_3$ , мм	Скорость заготовки $V_3$ , м/мин	Продольная подача на оборот $S_{пр}$ , мм/об					
		< 2,5	2,5...3,7	3,7...5,6	5,6...8,5	8,5...13	> 13
< 30	9	0,039	0,024	0,017	0,011	0,007	0,006
	11	0,031	0,020	0,014	0,009	0,006	0,005
	14	0,024	0,017	0,011	0,007	0,005	0,004
	17	0,020	0,014	0,009	0,006	0,004	0,003
30...50	17	0,031	0,020	0,014	0,009	0,006	0,005
	21	0,024	0,017	0,011	0,007	0,006	0,004
	26	0,020	0,014	0,009	0,006	0,004	0,003
	32	0,017	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002

Таблица П3

Поправочные коэффициенты на радиальную подачу при круговом наружном шлифовании

Тип стали	Качественные стали	Конструкционные стали	Низколегированные стали	Среднелегированные стали
$K_M$	0,95	0,97	0,99	1,0
Диаметр шлифовального круга	200	220	240	260
$K_D$	0,39	0,4	0,41	0,42
Скорость шлифовального круга	от 10 до 25		от 25 до 35	
$K_{V_k}$	0,9		1,0	
Припуск на обработку	0,1	0,2	0,3	0,4
$K_h$	0,76	0,80	0,85	1,0

Шкала твердости Мооса

Минерал	Твердость	Минерал	Твердость
Тальк	1	Ортоклаз	6
Гипс	2	Кварц	7
Кальцит	3	Топаз	8
Флюорит	4	Корунд	9
Апатит	5	Алмаз	10

Паспортные данные круглошлифовального станка 3М131

Наибольший диаметр шлифуемой поверхности, мм	280
Мощность двигателя шлифуемой бабки, $N_0$ , кВт;	7,5
КПД станка, $\eta$	0,8
Частота вращения шлифовального круга, об/мин	1112 и 1285
Частота вращения заготовки (бесступенчатое регулирование), об/мин	20...400
Скорость продольной подачи стола (бесступенчатое регулирование), об/мин	50...5000
Поперечная подача шлифовального круга (бесступенчатое регулирование), $S_t$ , мм/двойной ход	0,002...0,1

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ .....	4
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ .....	4
3. АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ .....	7
4. СИЛА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ .....	15
5. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ШЛИФОВАНИЯ.....	17
5.1. Обработка заготовок на плоскошлифовальных станках .....	17
5.2. Обработка заготовок на круглошлифовальных станках.....	21
5.3. Обработка заготовок на внутришлифовальных станках .....	23
5.4. Обработка заготовок на бесцентрово-шлифовальных станках .....	24
5.5. Шлифование резьбы и зубчатых колес .....	26
6. ШЛИФОВАЛЬНЫЕ СТАНКИ.....	29
7. ПОРЯДОК РАСЧЕТА РЕЖИМА РЕЗАНИЯ .....	33
7.1. Выбор шлифовального круга .....	33
7.2. Последовательность расчета режима шлифования.....	37
7.3. Порядок выполнения практической работы .....	38
8. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА .....	39
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	41
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ.....	42
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	43