

# ПРОЦЕССЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ и ИНСТРУМЕНТЫ

## ТЕМА 1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Характеристики:

– твердость  $\left\{ \begin{array}{l} \text{HR} \left\{ \begin{array}{l} \text{HRA} \\ \text{HRC} \end{array} \right. \\ \text{HV} \end{array} \right.$

– прочность  $\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\text{в}} \\ \sigma_{-\text{в}} \\ \sigma_{\text{и}} \end{array} \right.$

– термостойкость  $\theta_{\text{k}} \geq \theta_{\text{p}}$

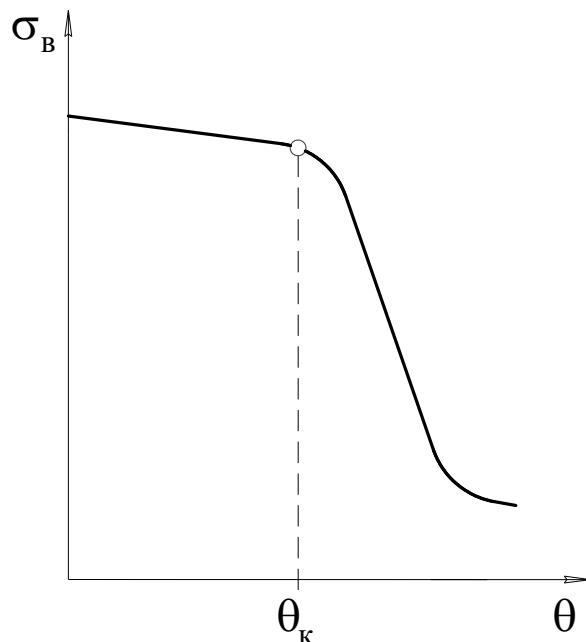


Рис. 1.1. О термостойкости материалов

– технологичность

– относительная стоимость  $p = \frac{Q}{V}$ , руб./см<sup>3</sup>

# УГЛЕРОДИСТЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

У 8 Г А

Таблица 1.1. Химический состав углеродистых инструментальных сталей

| Марка стали | Содержание элемента, % |             |             |          |          |                    |
|-------------|------------------------|-------------|-------------|----------|----------|--------------------|
|             | углерод                | кремний     | марганец    | серы     | фосфор   | хром, медь, никель |
| У8          | 0,76...0,83            | 0,17...0,33 | 0,17...0,33 | до 0,028 | до 0,030 | до 0,2 каждого     |
| У8Г         |                        |             | 0,33...0,58 | до 0,018 | до 0,025 |                    |
| У8ГА        |                        |             | до 0,028    | до 0,030 | до 0,025 |                    |
| У10         |                        |             | 0,17...0,33 | до 0,018 | до 0,025 |                    |
| У12А        |                        |             | до 0,028    | до 0,030 | до 0,025 |                    |

HRC 62...64 |  $\sigma_{\text{в}} \approx \sigma_{\text{и}} = 2,8 \dots 3,0 \text{ ГПа}$  |  $\theta_{\text{k}} = 200 \dots 250^{\circ}\text{C}$

# ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

9 Г 2 Ф

Таблица 1.2. Химический состав легированных инструментальных сталей

| Марка стали | Содержание элемента, % |                        |           |           |           |           |
|-------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             | углерод                | кремний                | марганец  | хром      | вольфрам  | ванадий   |
| 9ХС         | 0,85...0,95            | 1,2...1,6<br>0,1...0,4 | 0,3...0,6 | 0,9...1,2 | —         | —         |
| ХВГ         | 0,90...1,05            |                        | 0,8...1,1 | 0,9...1,2 | 1,2...1,6 | —         |
| 11ХФ        | 1,05...1,15            |                        | 0,4...0,7 | 0,4...0,7 | —         | 0,1...0,3 |
| В2Ф         | 1,05...1,22            |                        | —         | —         | 1,6...2,0 |           |
| ХВ4Ф        | 1,25...1,45            |                        | 0,1...0,4 | 0,4...0,7 | 3,5...4,3 |           |

HRC 62...64 |  $\sigma_{\text{в}} \approx \sigma_{\text{и}} = 3,0 \dots 3,2 \text{ ГПа}$  |  $\theta_{\text{k}} = 350 \dots 400^{\circ}\text{C}$

## БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

Р
9
М
4
К
8

**Таблица 1.3. Химический состав быстрорежущих сталей**

| Марка стали | Содержание элемента, % |             |           |            |           |           |
|-------------|------------------------|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|
|             | углерод                | вольфрам    | ванадий   | кобальт    | молибден  | хром      |
| P18         | 0,73...0,83            | 17,0...18,5 | 1,0...1,4 | до 0,5     | до 1,0    | 3,8...4,4 |
| P12Ф3       | 0,95...1,05            | 12,0...13,0 | 2,5...3,0 |            |           |           |
| P9К10       | 0,90...1,00            | 9,0...10,5  | 2,0...2,6 | 9,0...10,5 |           | 3,8...4,4 |
| P6М5        | 0,82...0,90            | 5,5...6,5   | 1,7...2,1 | до 0,5     | 4,8...5,3 |           |

HRC 64...66 |  $\sigma_{-v} \approx \sigma_i = 3,2...3,5$  ГПа |  $\theta_k = 600...620^\circ\text{C}$

## МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

### ОДНОКАРБИДНЫЕ СПЛАВЫ

В
К
10
М

**Таблица 1.4. Физико-механические свойства однокарбидных твердых сплавов**

| Марка сплава | $\sigma_i$ , МПа | HRA  |
|--------------|------------------|------|
| ВК3          | 1176             | 89,5 |
| ВК6          | 1519             | 88,5 |
| ВК10         | 1764             | 87,0 |
| ВК20         | 2058             | 84,0 |

**Таблица 1.5. Влияние размера зерна WC на свойства твердого сплава ВК6**

| Марка сплава | Размер зерна, мкм | $\sigma_i$ , МПа | $\sigma_{-v}$ , МПа | HRA  |
|--------------|-------------------|------------------|---------------------|------|
| ВК6ОМ        | 1,3               | 1270             | —                   | 90,5 |
| ВК6М         | 1,6               | 1421             | 4910                | 90,0 |
| ВК6          | 2,0               | 1519             | 4390                | 88,5 |
| ВК6В         | 3,3               | 1660             | 3680                | 87,5 |

## ДВУХ- И ТРЕХКАРБИДНЫЕ СПЛАВЫ

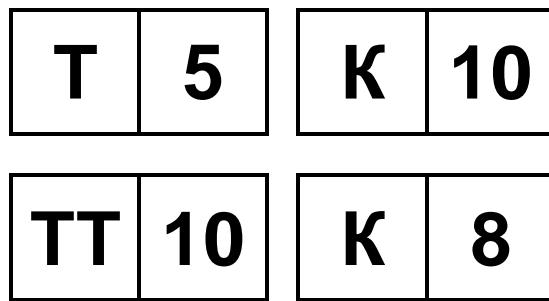


Таблица 1.6. Физико-механические свойства двух- и трехкарбидных сплавов

| Марка сплава | $\sigma_u$ , МПа | HRA  | Марка сплава | $\sigma_u$ , МПа | HRA  |
|--------------|------------------|------|--------------|------------------|------|
| T5K10        | 1421             | 88,5 | TT7K12       | 1666             | 87,0 |
| T14K8        | 1274             | 89,5 | TT8K6        | 1323             | 90,5 |
| T15K6        | 1176             | 90,0 | TT10K8       | 1617             | 89,0 |
| T30K4        | 980              | 92,0 | TT20K9       | 1470             | 91,0 |

HRA 84...92 (HRC 72...76) |  $\sigma_{-b} = 3,5 \dots 5,0$  ГПа |  $\sigma_u = 1,2 \dots 1,6$  ГПа

$\theta_k = 800 \dots 1000^\circ\text{C}$

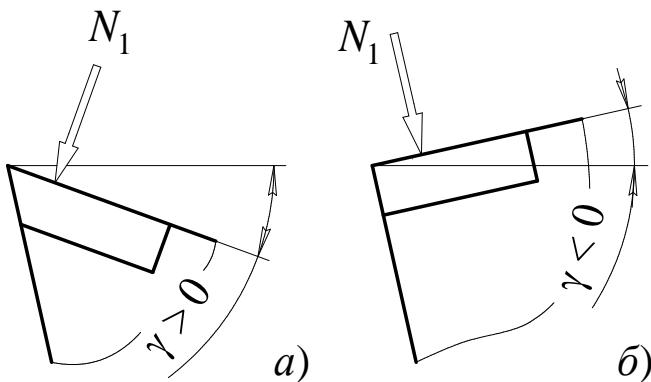


Рис. 1.2. Работа инструмента в условиях изгиба (a) и сжатия (b)

## БЕЗВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Таблица 1.7. Физико-механические свойства безвольфрамовых твердых сплавов

| Марка сплава | $\sigma_u$ , МПа | HRA  |
|--------------|------------------|------|
| TH-20        | 1050             | 90,0 |
| KTH-16       | 1200             | 89,0 |
| KTH-20       | 1550             | 90,0 |
| KTH-30       | 1700             | 88,5 |

# НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## РЕЖУЩАЯ КЕРАМИКА

Таблица 1.8. Состав и свойства режущей керамики

| Вид керамики    | Марка     | Содержание элементов  | $\sigma_i$ , МПа | HRA |
|-----------------|-----------|---|------------------|-----|
| оксидная        | ЦМ-332    | 99% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 1% $\text{MgO}$                   | 300...350        | 91  |
|                 | ВШ-75     | $\text{Al}_2\text{O}_3$   | 250...300        | 92  |
| оксикарбидная   | В-3       | 60% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 40% $\text{TiC}$                  | 600              | 94  |
|                 | ВОК-63    |   | 650...700        |     |
| оксидонитридная | кортинит  | 70% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 30% $\text{TiN}$                  | 640              | 92  |
| нитридная       | силинит-Р | $\text{Si}_3\text{N}_4$ + $\text{Y}_2\text{O}_3$ + $\text{TiC}$ | 700...800        | 94  |

HRA 91...94 (HRC 75...78) |  $\sigma_i = 250...800$  МПа |  $\theta_k \sim 1200^\circ\text{C}$

## ПРИРОДНЫЙ АЛМАЗ

HV 98000 |  $\sigma_{-b} = 1960$  МПа |  $\sigma_i = 290$  МПа |  $\theta_k \sim 800^\circ\text{C}$

## СИНТЕТИЧЕСКИЕ СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 1.9. Физико-механические характеристики синтетических СТМ

| Основа материала       | Марка      | $\sigma_{-b}$ , ГПа | $\sigma_i$ , МПа | $\text{HV} \cdot 10^{-3}$ | $\theta_k$ , °C |
|------------------------|------------|---------------------|------------------|---------------------------|-----------------|
| синтетический алмаз    | АСБ        | 0,4...0,6           | 780              | 49,0...88,2               | 600...770       |
|                        | АСПК       | 0,4...0,8           | 500...1000       | 78,4...97,0               | 800...900       |
|                        | АТП        | 0,3...0,4           | 800...850        | 49,0...51,0               | 680...730       |
| кубический нитрид бора | Эльбор-Р   | 2,2...3,2           | 700...980        | 76,5...91,0               | 1070...1200     |
|                        | Гексанит-Р | 2,0...4,0           | 1200...1500      | 71,8...91,0               | 1000...1100     |
|                        | Киборит    | 2,6...3,2           | 550...650        | 76,5...86,0               | 1300            |

## ТЕМА 2. ЕДИНАЯ ГЕОМЕТРИЯ РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ

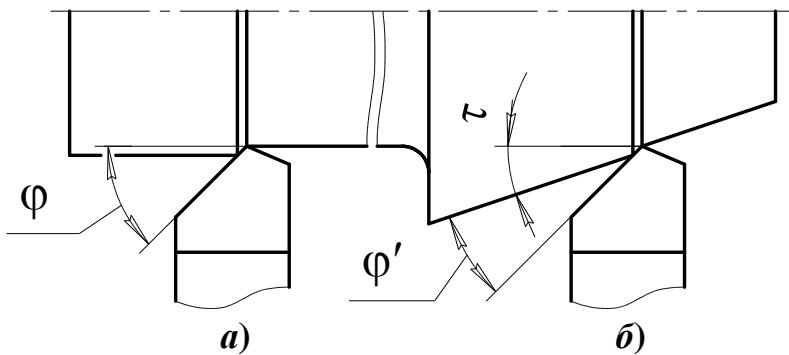


Рис. 2.1. Главный угол в плане токарного резца при обработке цилиндрической (а) и конической (б) поверхностей

Плоскости единой геометрии:

- основная плоскость  $P_V$
- плоскость резания  $P_n$
- главная секущая плоскость  $P_\tau$
- осевая секущая плоскость  $P_s$
- радиальная секущая плоскость  $P_r$
- нормальная секущая плоскость  $P_\lambda$

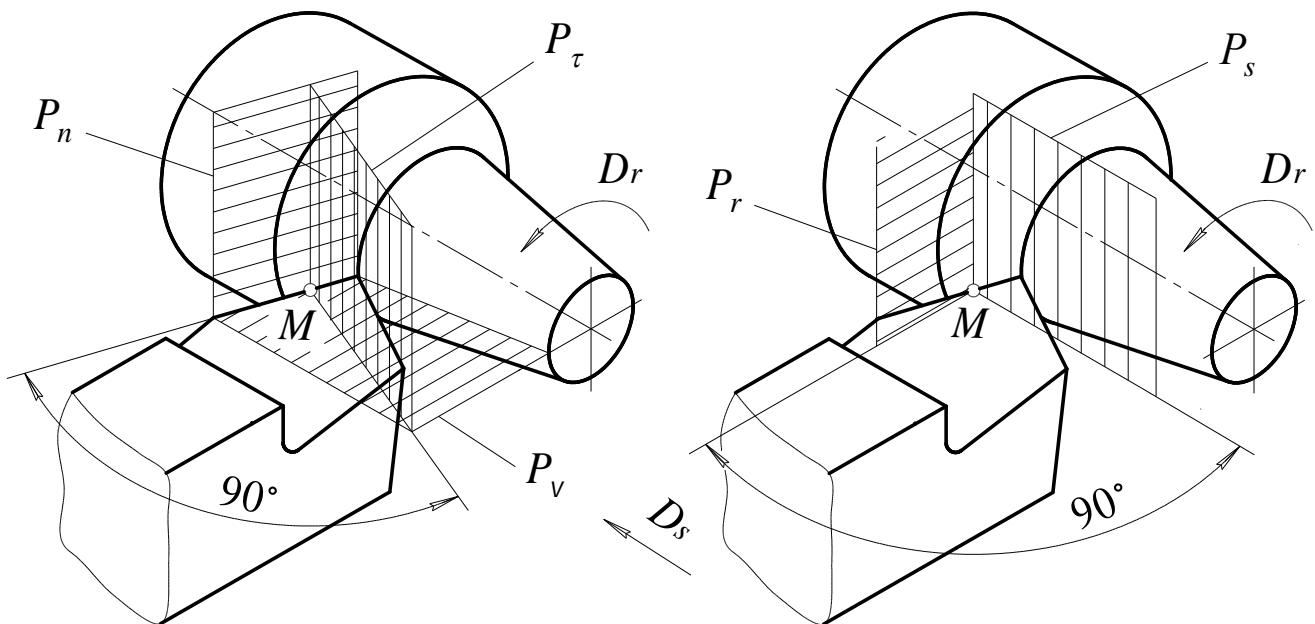


Рис. 2.2. Система плоскостей при резании

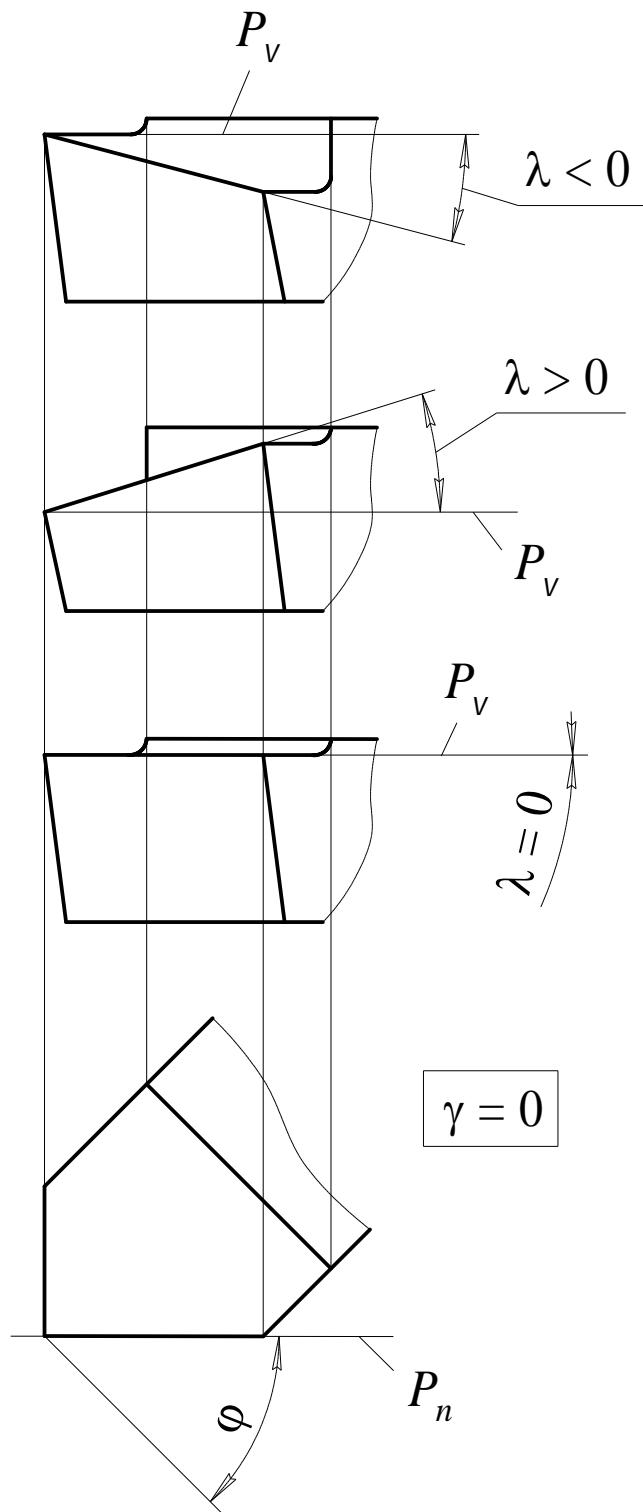


Рис. 2.3. Угол наклона главной режущей кромки

Направление схода стружки:

- при  $\lambda < 0 \rightarrow$  по направлению подачи инструмента
- при  $\lambda > 0 \rightarrow$  противоположно направлению подачи инструмента

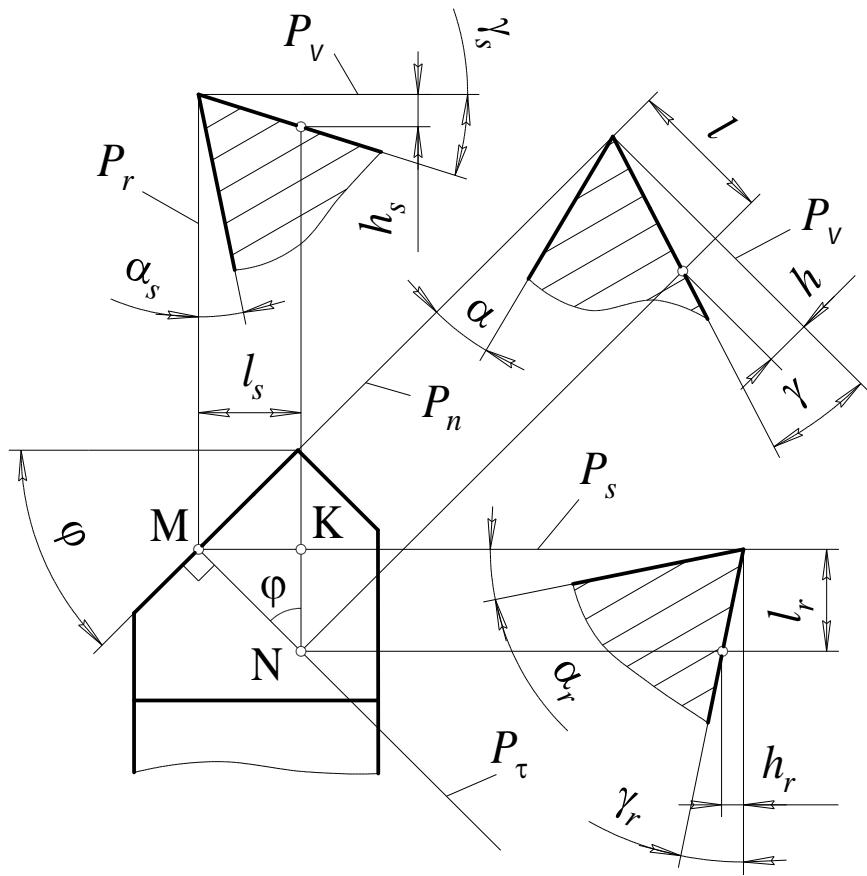


Рис. 2.4. К выводу формул единой геометрии

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{l}; \quad \operatorname{tg} \gamma_s = \frac{h_s}{l_s}; \quad \operatorname{tg} \gamma_r = \frac{h_r}{l_r}; \quad h = h_s + h_r \Rightarrow l \operatorname{tg} \gamma = l_s \operatorname{tg} \gamma_s + l_r \operatorname{tg} \gamma_r$$

Из  $\Delta MNK$   $l_s = l \sin \varphi$ ;  $l_r = l \cos \varphi$ , тогда

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_s \sin \varphi + \operatorname{tg} \gamma_r \cos \varphi \quad (2.1)$$

Из других геометрических соображений

$$\operatorname{tg} \gamma_s = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_r = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - \operatorname{tg} \lambda \sin \varphi \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} \gamma_s \cos \varphi - \operatorname{tg} \gamma_r \sin \varphi \quad (2.4)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_s = \operatorname{ctg} \alpha \sin \varphi + \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi. \quad (2.5)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_r = \operatorname{ctg} \alpha \cos \varphi - \operatorname{tg} \lambda \sin \varphi \quad (2.6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_s \sin \varphi \quad (2.7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_r \cos \varphi \quad (2.8)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_\lambda = \operatorname{tg} \gamma \cos \lambda \quad (2.9)$$

# ТЕМА 3. ИНСТРУМЕНТ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

## 3.1. РЕЗЦЫ

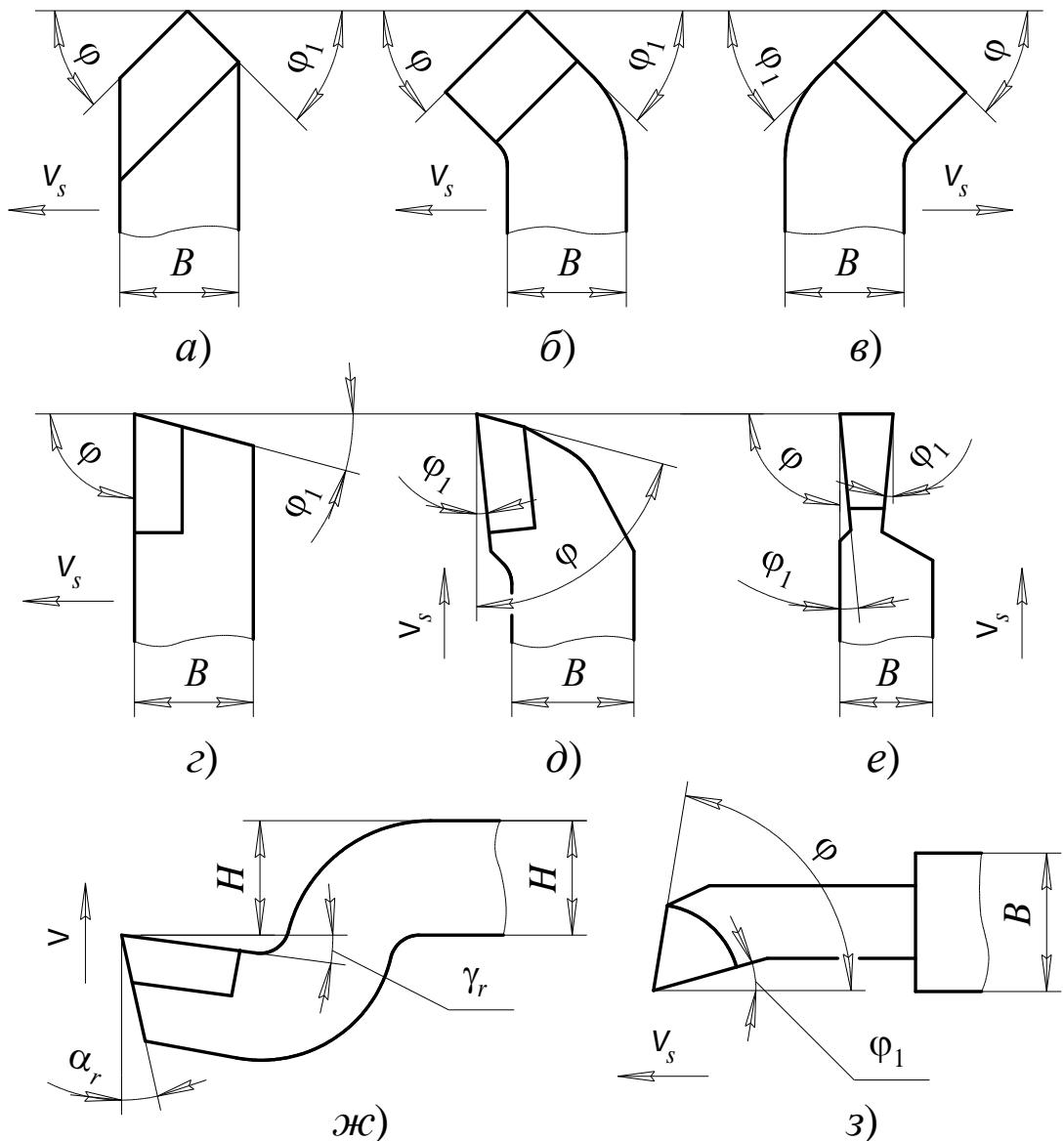


Рис. 3.1. Виды резцов

Таблица 3.1. Практически применяемые главные углы в плане резцов

| Условия работы резца   | $\phi$ , град. |
|--|----------------|
| Обработка с малой глубиной резания при особо жесткой технологической системе | 10...30        |
| Обработка при достаточно жесткой технологической системе                     | 45             |
| Обработка с ударами и при недостаточно жесткой технологической системе       | 60...75        |
| Обработка длинных и тонких заготовок   | 80...90        |

## Целесообразные значения передних углов

– при обработке сталей

$$\gamma_{\text{п}} = C_{\gamma} \left( \frac{\sigma_{\text{в}}}{1000} \right)^x \quad (3.1)$$

– при обработке чугунов

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{C_{\gamma}}{\text{HB}^x} \quad (3.2)$$

Таблица 3.2. Коэффициенты в формулах (3.1) и (3.2)

| Инструментальный материал | Коэффициент  | Обрабатываемый материал                  |                                       |                  |
|---------------------------|--------------|--|---------------------------------------|------------------|
|                           |              | Сталь                                    |                                       | Чугун            |
|                           |              | $\sigma_{\text{в}} \leq 800 \text{ МПа}$ | $\sigma_{\text{в}} > 800 \text{ МПа}$ |                  |
| Твердый сплав             | $C_{\gamma}$ | 0,25                                     | - 5,0                                 | $2,5 \cdot 10^5$ |
|                           | $x$          | - 8,0                                    | 8,0                                   | 2,0              |
| Быстрорежущая сталь       | $C_{\gamma}$ | 11,0                                     | не применяется                        | $6,5 \cdot 10^3$ |
|                           | $x$          | - 1,0                                    |                                       | 1,2              |

## Целесообразный задний угол

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{C_{\alpha}}{a^{0,3}} \quad (3.3)$$

$$C_{\alpha} = \begin{cases} 7,6 & \text{– при обработке сталей} \\ 5,4 & \text{– при обработке чугунов} \end{cases}$$

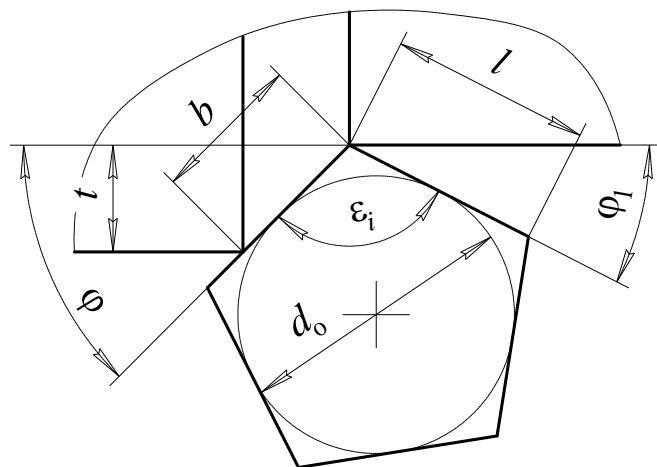


Рис. 3.2. К выбору параметров сменных многогранных пластин

$$\varepsilon_i = 180 \left( 1 - \frac{2}{i_{rp}} \right), \text{ град.} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_i = 180^\circ - \varphi - \varphi_1 \quad (3.5)$$

$$i_{rp} = \left[ \frac{360}{\varphi + \varphi_1} \right] \quad (3.6)$$

$$l > \frac{t}{\sin \varphi} \quad (3.7)$$

$$l = d_o \operatorname{tg} \left( \frac{180}{i_{rp}} \right)$$

$$d_o > \frac{t}{\sin \varphi} \operatorname{ctg} \left( \frac{180}{i_{rp}} \right) \quad (3.8)$$

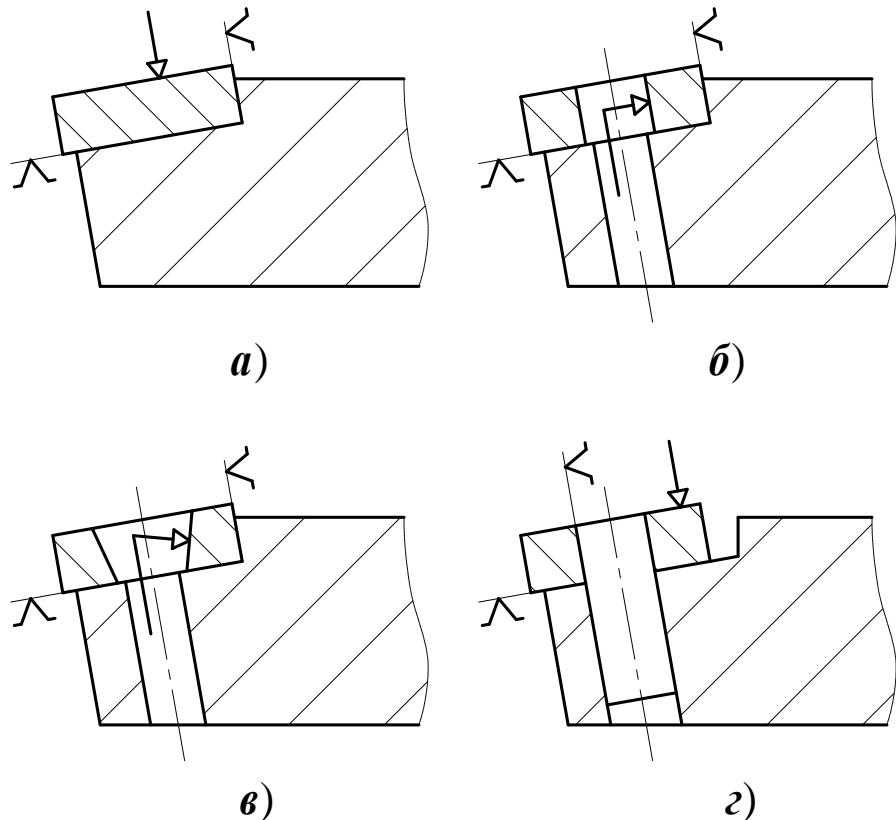


Рис. 3.3. Схемы установки сменных многогранных пластин

### 3.2. СВЁРЛА

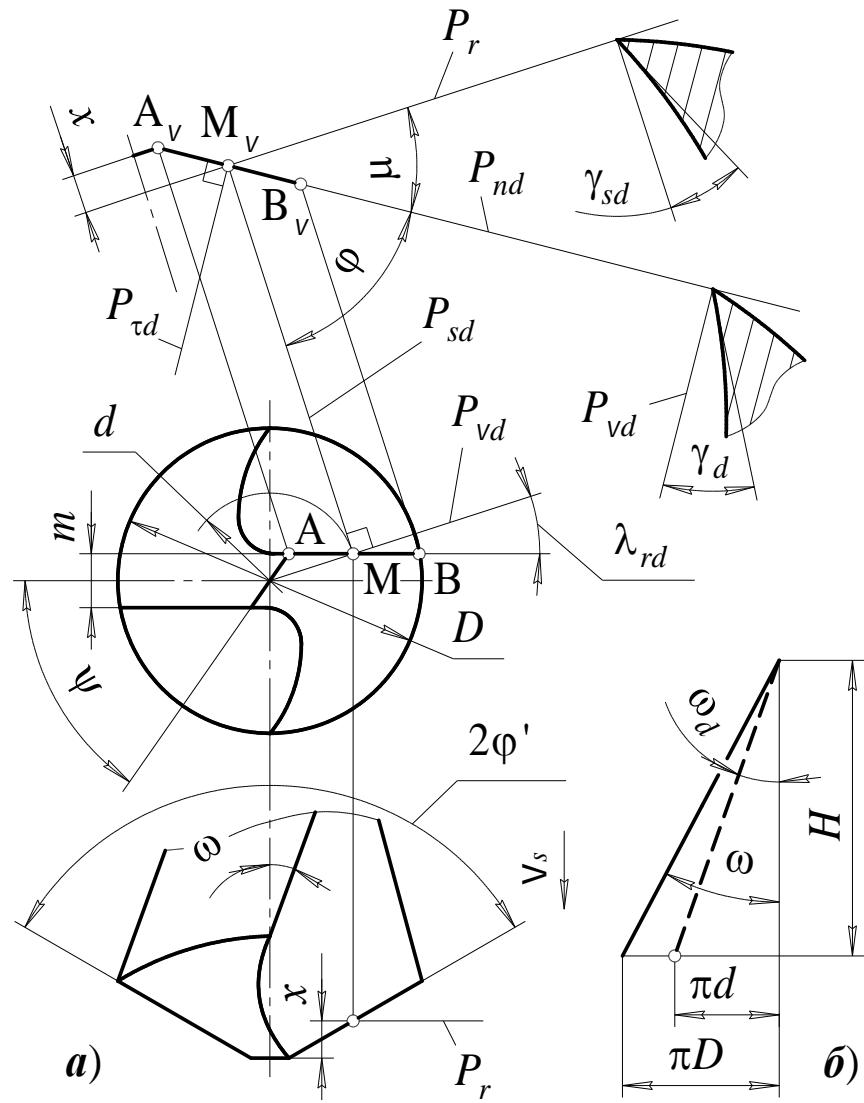


Рис. 3.4. К анализу углов спирального сверла

$$\tan \omega = \frac{\pi D}{H}; \quad \tan \omega_d = \frac{\pi d}{H}$$

При  $\omega_d = \gamma_{sd}$

$$\tan \gamma_{sd} = \frac{d}{D} \tan \omega \quad (3.9)$$

Из единой геометрии лезвия (формула (2.2))

$$\tan \gamma_{sd} = \tan \gamma_d \sin \varphi + \tan \lambda_d \cos \varphi \Rightarrow$$

$$\tan \gamma_d = \frac{\tan \gamma_{sd}}{\sin \varphi} - \tan \lambda_d \cot \varphi \quad (3.10)$$

$$\sin \lambda_{rd} = \frac{m}{d} \quad (3.11)$$

$$\operatorname{tg} \lambda_{rd} = \frac{m/d}{\sqrt{1 - (m/d)^2}} = \frac{m}{\sqrt{d^2 - m^2}} \quad (3.12)$$

$$\operatorname{tg} \lambda_d = \operatorname{tg} \lambda_{rd} \cos \mu = \operatorname{tg} \lambda_{rd} \cos(90^\circ - \varphi) = \operatorname{tg} \lambda_{rd} \sin \varphi \quad (3.13)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_d = \frac{d}{D} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \varphi} - \frac{m \cos \varphi}{\sqrt{d^2 - m^2}} \quad (3.14)$$

$$d \in [d_{\text{II}}; D] \quad (3.15)$$

$$d_{\text{II}} = \frac{m}{\sin \psi} \quad (3.16)$$

**Пример.** Спиральное сверло диаметром 20 мм имеет угол заборного конуса  $90^\circ$ , угол подъема винтовой канавки  $30^\circ$  и перемычку толщиной 3 мм с углом наклона  $55^\circ$ .

Каков перепад передних углов вдоль главной режущей кромки сверла?

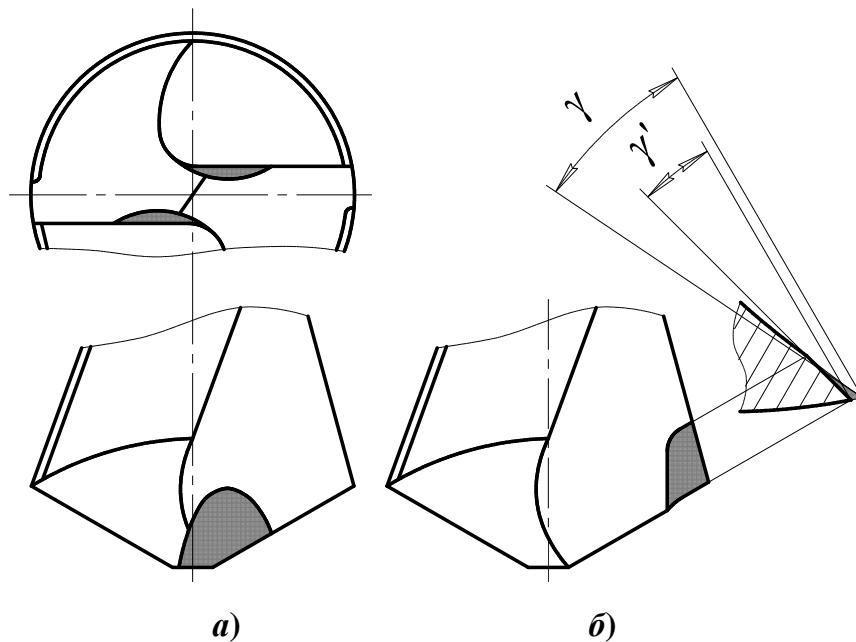


Рис. 3.5. Подточка сверла у перемычки (a) и на периферии (б)

$$\overline{\operatorname{grad} \gamma} = \frac{\gamma_D - \gamma_{d_{\text{II}}}}{l} \quad (3.17)$$

$$l \approx \frac{D}{2 \sin \varphi}$$

Таблица 3.3. Угол подъема винтовой канавки и угол заборного конуса сверл, град.

| Обрабатываемый материал                       | $\omega$ | $2\varphi$ |
|---|----------|------------|
| Сталь конструкционная                         | 20...35  | 116...120  |
| Сталь коррозионно-стойкая, высоколегированная | 15...25  | 125...150  |
| Чугун средней твердости, бронза               | 20...30  | 90...100   |
| Латунь, алюминиевые сплавы                    | 30...45  | 130...140  |

$$\alpha_{sd} = \alpha_{so} - \arctg \frac{s_o}{\pi d} \quad (3.18)$$

Таблица 3.4. Задний угол и угол наклона перемычки спиральных сверл, град.

| $D$ , мм      | св. 2 до 3,5 | св.3,5 до 5 | св.5 до 7 | св.7 до 11 | св.11 до 18 | св.18 |
|---------------|--------------|-------------|-----------|------------|-------------|-------|
| $\alpha_{sD}$ | 14           | 11          |           | 9          |             | 8     |
| $\psi$        | 47           | 48          | 49        | 50         | 52          | 55    |

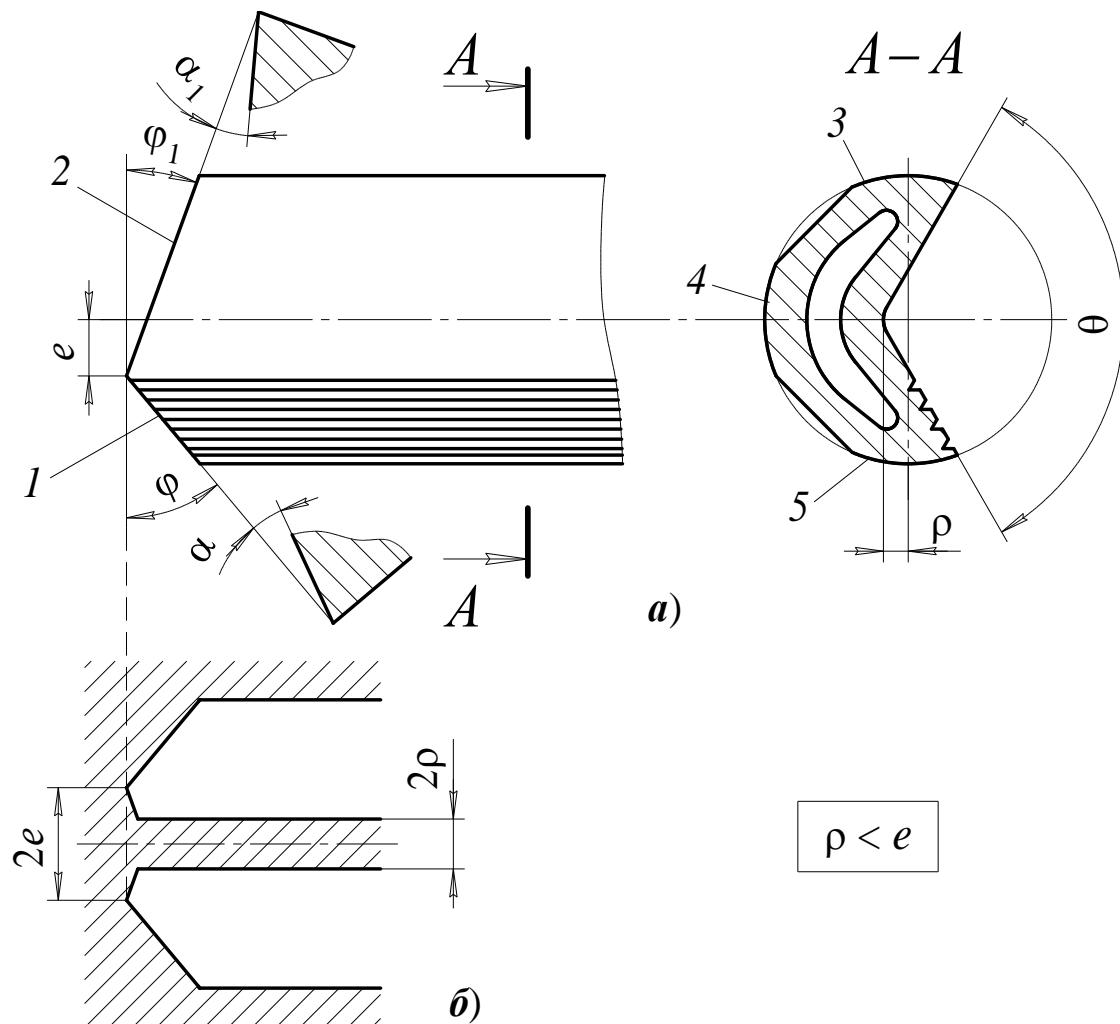


Рис. 3.6. Рабочая часть сверла для глубокого сверления (а) и сечение отверстия, возникающее в процессе работы сверла (б)

### 3.3. ЗЕНКЕРЫ

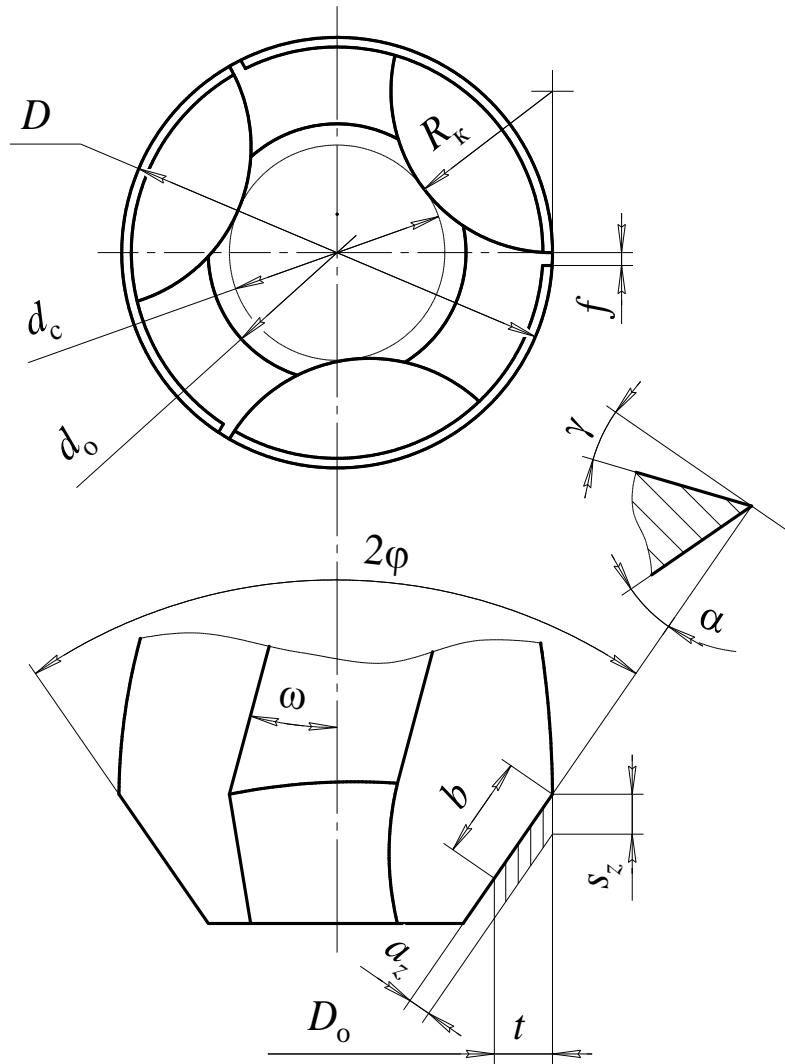


Рис. 3.7. Геометрические параметры трёхзубого зенкера

$$d_c \approx 0,5D; \quad d_o = D - (3...4)t$$

$$R_k = \frac{D^2 - d_c^2}{4d_c}$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \varphi} - \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi \quad (3.19)$$

$$\operatorname{tg} \omega = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + \frac{1}{2} \operatorname{tg} \lambda \sin 2\varphi \quad (3.20)$$

$$\varphi = \begin{cases} 60^\circ & \text{– при обработке сквозных отверстий} \\ 90^\circ & \text{– при обработке глухих отверстий} \end{cases}$$

### 3.4. РАЗВЕРТКИ

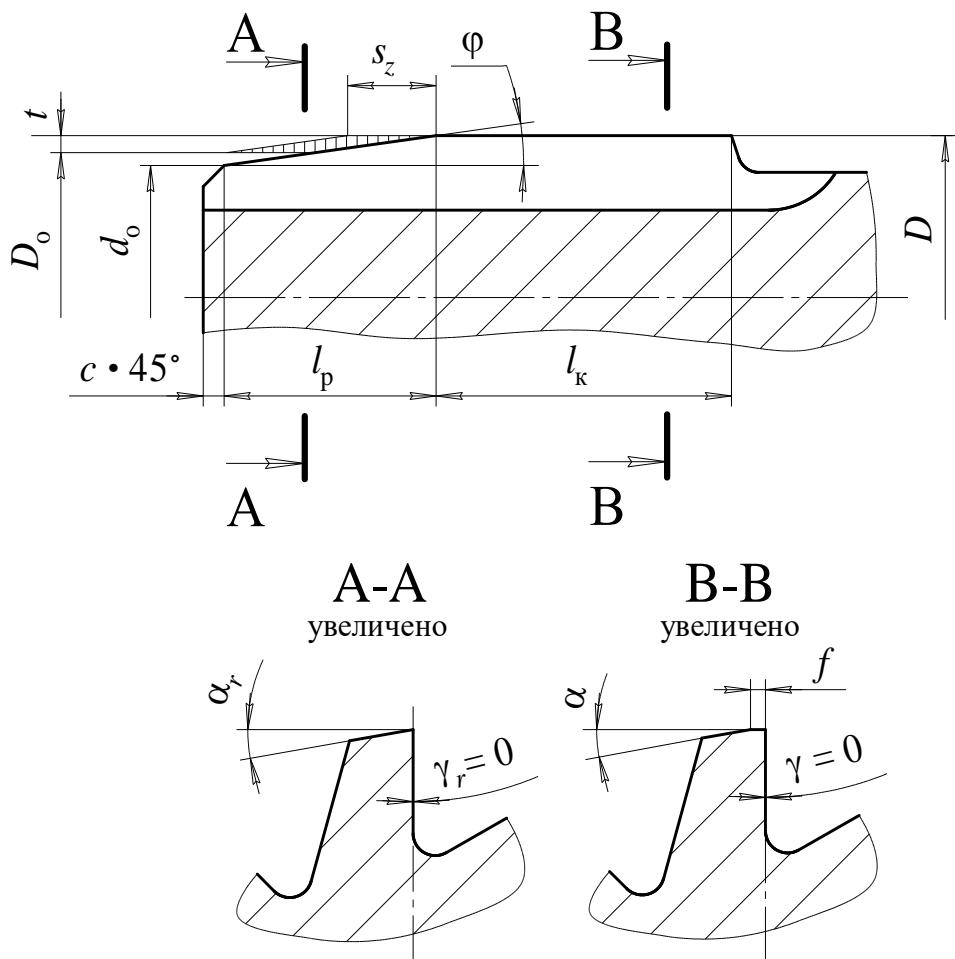
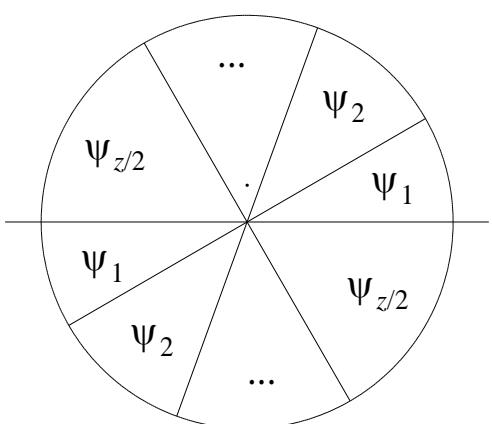


Рис. 3.8. Геометрия зуба цилиндрической развертки

$$d_o = D - 2l_p \operatorname{tg} \phi < D_o$$

$$z = [1,5\sqrt{D} + (2...4)] \quad (3.21)$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_2 = \psi_1 + \Delta \\ \psi_3 = \psi_2 + \Delta = \psi_1 + 2\Delta \\ \dots \\ \psi_{z/2} = \psi_1 + \left(\frac{z}{2} - 1\right)\Delta \end{array} \right.$$

$$\sum_{i=1}^{z/2} \psi_i = \frac{\psi_1 + \psi_{z/2}}{2} \cdot \frac{z}{2} = 180^\circ$$

Рис. 3.9. Неравномерный шаг зубьев прямозубой развертки

$$\psi_1 = \frac{360^\circ}{z} - \left(\frac{z}{2} - 1\right) \cdot \frac{\Delta}{2} \quad (3.22)$$

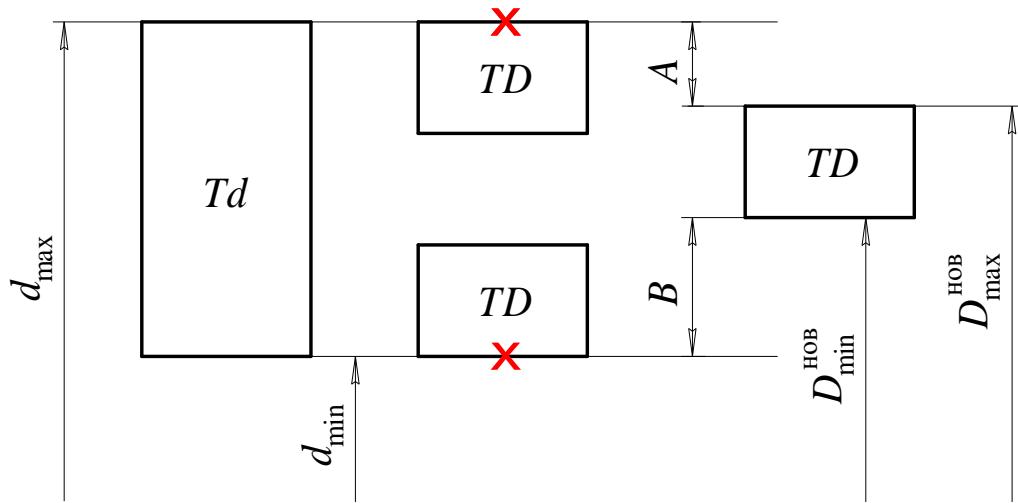


Рис. 3.10. Расположение поля допуска развертки

$$Td = d_{\max} - d_{\min}$$

$$TD \approx \frac{1}{3} Td$$

$$D_{\min}^{\text{НОВ}} = d_{\max} - A \quad (3.23)$$

$A$  – величина ожидаемой разбивки

$$D_{\min}^{\text{НОВ}} = d_{\min} + B \quad (3.24)$$

$B$  – запас на износ

$$B = \begin{cases} 0,6Td & \text{для 6 квалитета точности;} \\ 0,55Td & \text{для 7 квалитета точности;} \\ 0,45Td & \text{для 8 и выше квалитетов.} \end{cases} \quad (3.25)$$

**Пример.** Какой наибольший диаметр калибрующей части должна иметь новая развертка для обработки цилиндрического отверстия диаметром  $20H8(^{+0,033})$ ?

Какая максимальная величина разбивки допустима для этой развертки?

## ТЕМА 4. СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ, РАБОТАЮЩИЙ МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ

### 4.1. ФАСОННЫЕ РЕЗЦЫ

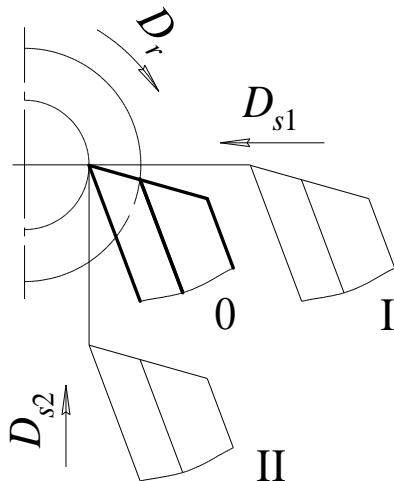


Рис. 4.1. Способы подачи фасонных резцов

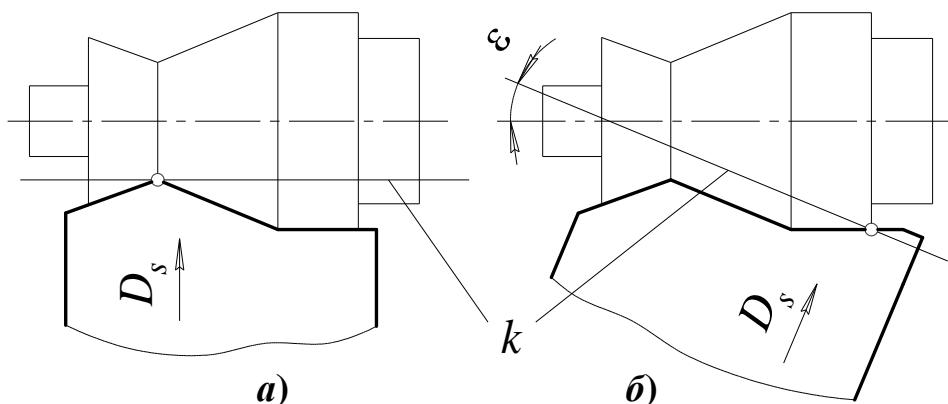


Рис. 4.2. Базовая линия при ортогональном (a) и неортогональном (б) врезании

Две задачи проектирования фасонных резцов:

1. Анализ переднего и заднего углов в различных точках профиля.
2. Расчет параметров профиля (профилирование) резца.

Обозначения:

- параметры профиля изделия → строчными буквами ( $d, h, \varphi$ )
- параметры профиля инструмента → прописными буквами ( $D, H, \Phi$ )

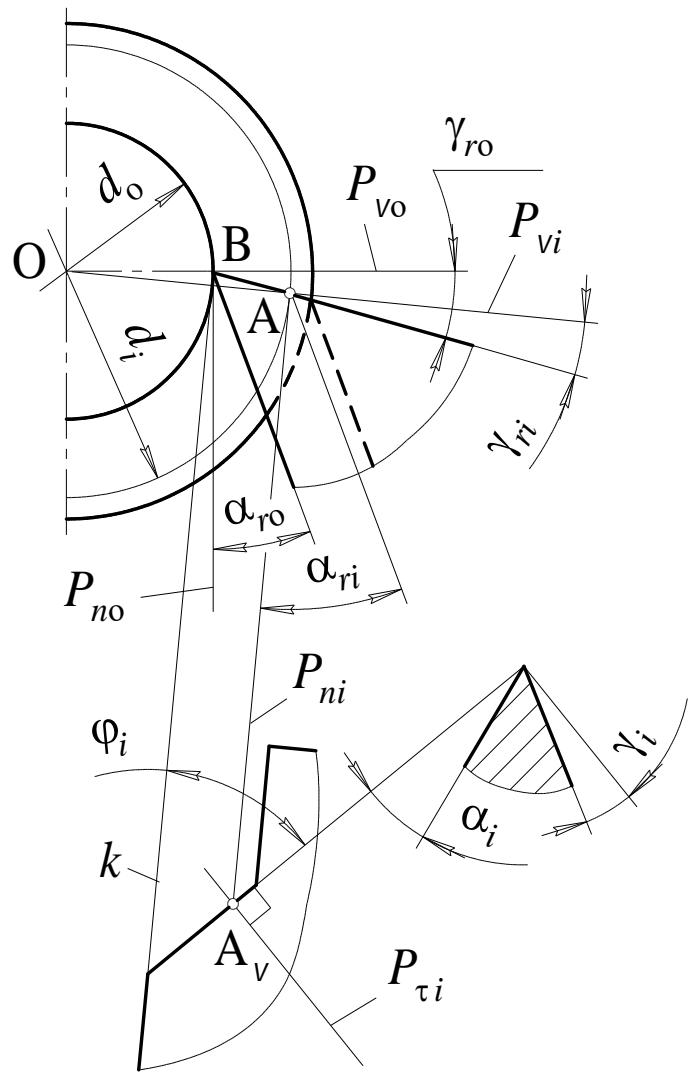


Рис. 4.3. К анализу углов фасонного резца

Из  $\Delta AOB$  по теореме синусов

$$\frac{d_o}{2 \sin \gamma_{ri}} = \frac{d_i}{2 \sin(180^\circ - \gamma_{ro})}$$

$$\sin \gamma_{ri} = \frac{d_o}{d_i} \sin \gamma_{ro} \quad (4.1)$$

$$\alpha_{ri} = \alpha_{ro} + (\gamma_{ro} - \gamma_{ri}) \quad (4.2)$$

При  $\gamma_{so} = 0$  и  $\lambda = 0$  из (2.1) и (2.6) получаем

$$\tan \gamma_i = \tan \gamma_{ri} \cos \varphi_i \quad (4.3)$$

$$\tan \alpha_i = \tan \alpha_{ri} \cos \varphi_i \quad (4.4)$$

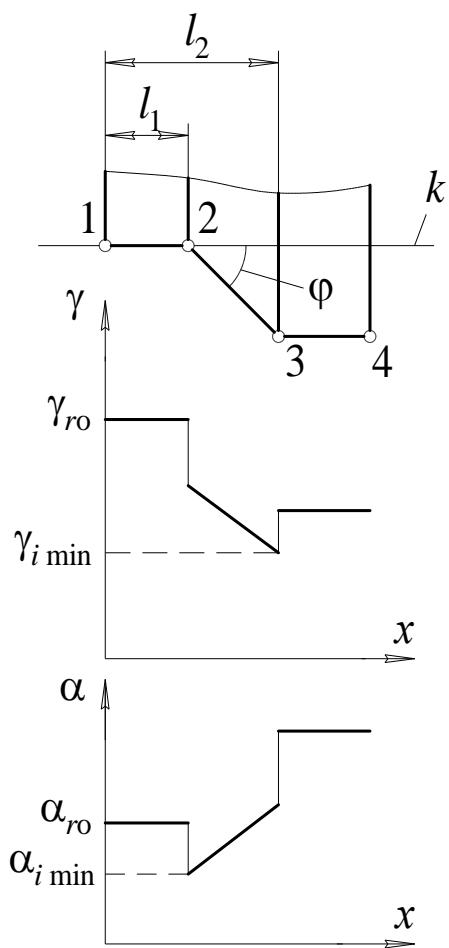


Рис. 4.4. Изменение углов вдоль профиля фасонного резца

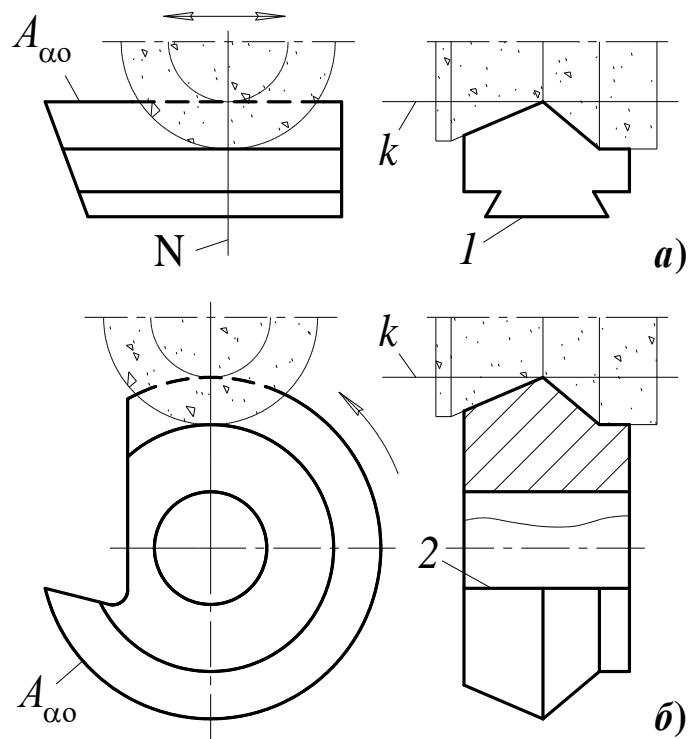
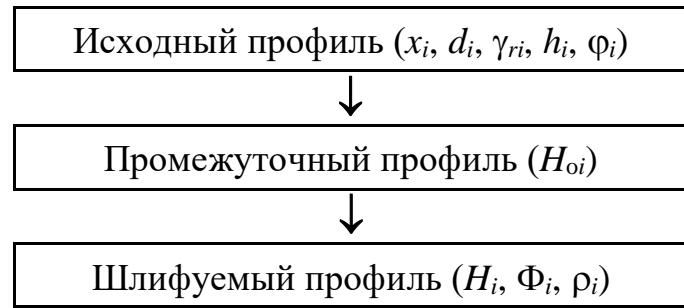


Рис. 4.5. Шлифование профиля призматического (а) и круглого (б) фасонного резца



$$h_i = \frac{d_i - d_o}{2} \quad (4.5)$$

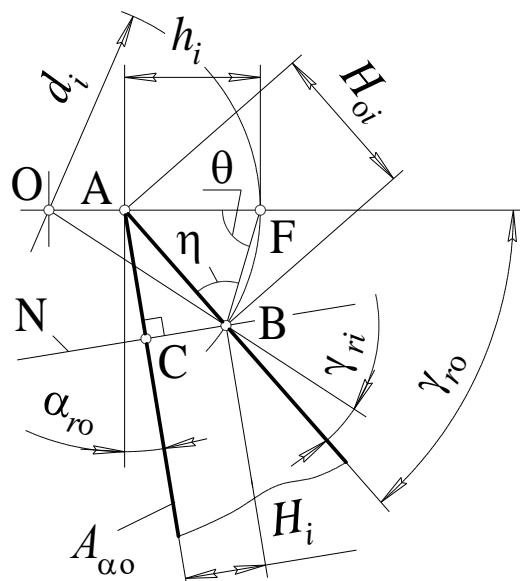


Рис. 4.6. К определению высоты шлифуемого профиля призматического резца

Из  $\Delta ABF$

$$H_{oi} = h_i \frac{\sin \theta}{\sin \eta}$$

Из  $\Delta OBF$

$$\theta = \frac{180^\circ - (\gamma_{ro} - \gamma_{ri})}{2} = 90^\circ - \frac{\gamma_{ro} - \gamma_{ri}}{2}$$

$$\eta = 180^\circ - \gamma_{ro} - \theta = 90^\circ - \frac{\gamma_{ro} + \gamma_{ri}}{2}$$

$$H_{oi} = h_i \frac{\cos((\gamma_{ro} - \gamma_{ri})/2)}{\cos((\gamma_{ro} + \gamma_{ri})/2)} \quad (4.6)$$

В  $\Delta ABC$

$$\angle BAC = 90^\circ - \gamma_{ro} - \alpha_{ro}$$

$$H_i = H_{oi} \sin(90^\circ - \gamma_{ro} - \alpha_{ro}) = H_{oi} \cos(\gamma_{ro} + \alpha_{ro}) \quad (4.7)$$

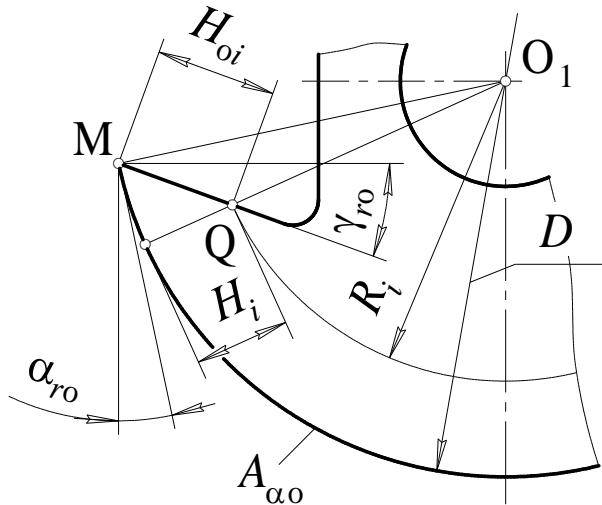


Рис. 4.7. К определению высоты шлифуемого профиля круглого резца

$$H_i = \frac{D}{2} - R_i \quad (4.8)$$

В  $\Delta QMO_1$

$$\angle QMO_1 = \gamma_{ro} + \alpha_{ro}$$

По теореме косинусов

$$R_i = \sqrt{\frac{D^2}{4} + H_{oi}^2 - DH_{oi} \cos(\gamma_{ro} + \alpha_{ro})} \quad (4.9)$$

**Таблица 4.1. Наружный диаметр круглого фасонного резца, мм**

| $d$ | 16 | 22 | 27 | 32  | 40  |
|-----|----|----|----|-----|-----|
| $D$ | 50 | 62 | 80 | 100 | 125 |

$$d = \begin{cases} (3,5...5)L^{0,7} & \text{при } L < 30 \text{ мм} \\ (2,5...3)L^{0,6} & \text{при } L \geq 30 \text{ мм} \end{cases}$$

$$H_i < h_i \leq H_{oi} \quad (4.10)$$

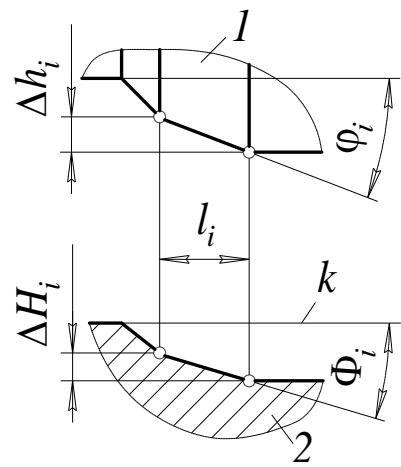


Рис. 4.8. Изменение углов профиля

$$\frac{\Delta h_i}{l_i} = \operatorname{tg} \varphi_i; \quad \frac{\Delta H_i}{l_i} = \operatorname{tg} \Phi_i$$

$$\operatorname{tg} \Phi_i = \frac{\Delta H_i}{\Delta h_i} \operatorname{tg} \varphi_i \quad (4.11)$$

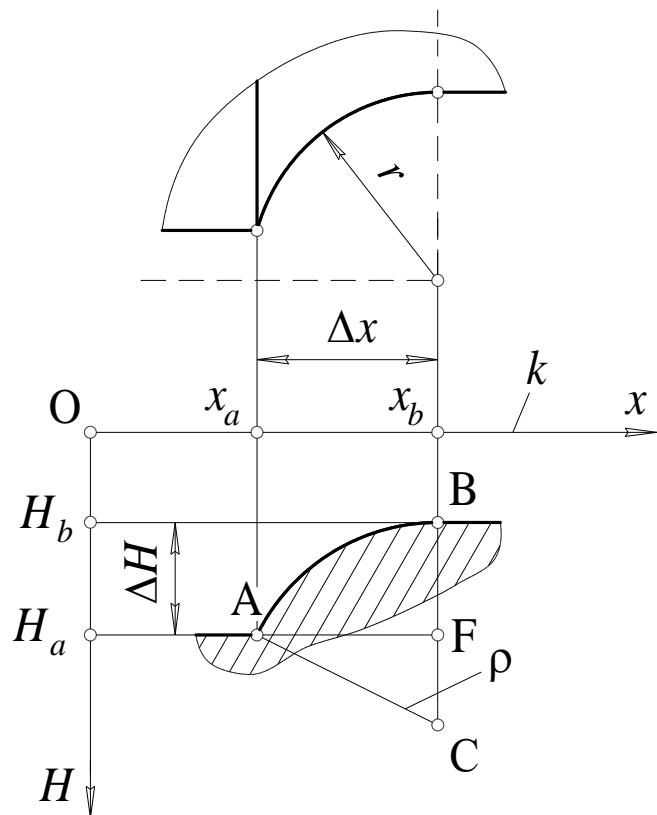


Рис. 4.9. К определению радиуса кругового участка на шлифуемом профиле фасонного резца (I вариант)

$$\Delta x = |x_a - x_b|$$

$$\Delta H = |H_a - H_b|$$

Из  $\Delta ACF$

$$\rho^2 = \Delta x^2 + (\rho - \Delta H)^2 = \Delta x^2 + \rho^2 - 2\rho \cdot \Delta H + \Delta H^2 \Rightarrow$$

$$\rho = \frac{\Delta x^2 + \Delta H^2}{2 \cdot \Delta H} \quad (4.12)$$

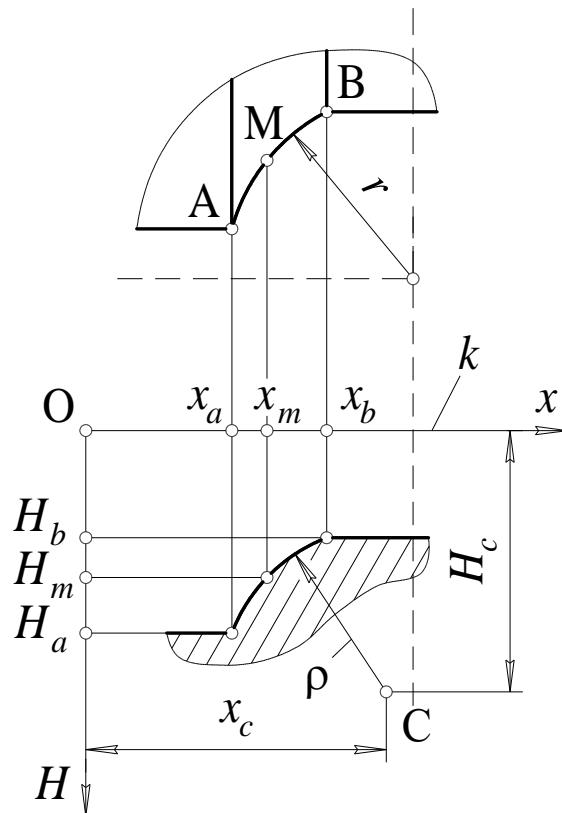


Рис. 4.10. К определению радиуса кругового участка на шлифуемом профиле фасонного резца (II вариант)

$$\left. \begin{array}{l} (x_a - x_c)^2 + (H_a - H_c)^2 = \rho^2 \\ (x_m - x_c)^2 + (H_m - H_c)^2 = \rho^2 \\ (x_b - x_c)^2 + (H_b - H_c)^2 = \rho^2 \end{array} \right\} \Rightarrow (x_c, H_c, \rho) \quad (4.13)$$

$$\left| \sqrt{(x_j - x_c)^2 + (H_j - H_c)^2} - \rho \right| \leq \delta \quad (4.14)$$

$\delta$  – поле допуска на изготовление профиля инструмента

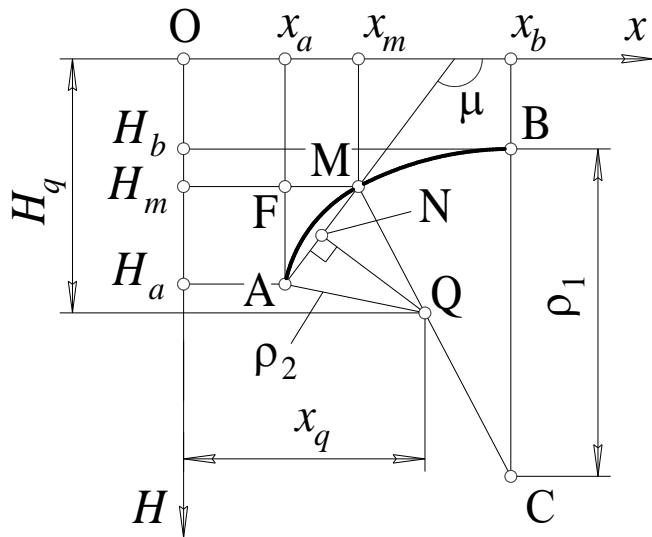


Рис. 4.11. Описание профиля дугами двух окружностей

$\rho_1$  – по формуле (4.12)

Центр дуги  $MB$  – в точке  $C(x_b, H_b + \rho_1)$ . Центр дуги  $AM$  – в точке  $Q \in CM$

Координаты точки  $N$  ( $AN = NM$ )

$$\left. \begin{array}{l} x_n = (x_a + x_m)/2 \\ H_n = (H_a + H_m)/2 \end{array} \right\} \quad (4.15)$$

Угловой коэффициент прямой  $AM$

$$k_1 = \operatorname{tg} \mu = \frac{H_a - H_m}{x_a - x_m} \quad (4.16)$$

Угловой коэффициент прямой  $NQ \perp AM$

$$k_2 = -\frac{1}{k_1} = \frac{x_m - x_a}{H_a - H_m} \quad (4.17)$$

Уравнение прямой  $NQ$ , проходящей через точку  $N$ ,

$$H = \frac{x_m - x_a}{H_a - H_m} (x - x_n) + H_n \quad (4.18)$$

Уравнение прямой  $CQ$ , проходящей через точки  $C$  и  $M$ ,

$$H = \frac{H_c - H_m}{x_c - x_m} (x - x_c) + H_c \quad (4.19)$$

Решая совместно (4.18) и (4.19), получим координаты точки  $Q(x_q, H_q)$ .

Радиус второй заменяющей дуги  $AM$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_q - x_a)^2 + (H_q - H_a)^2} \quad (4.20)$$

## Тангенциальные фасонные резцы

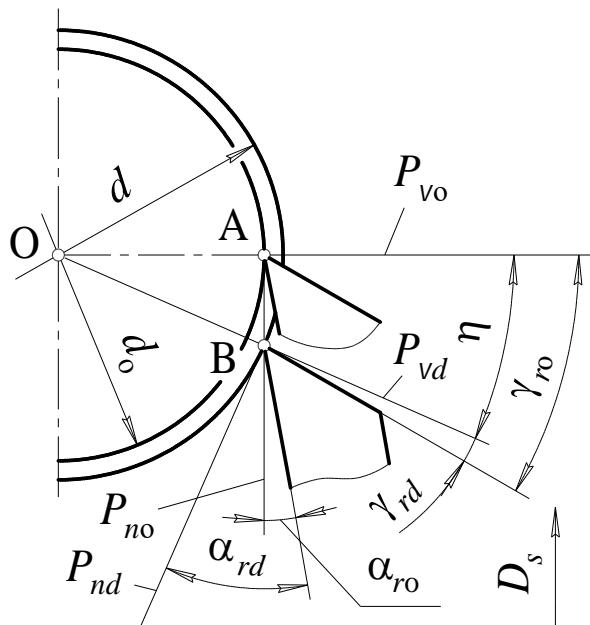


Рис. 4.12. Углы тангенциального резца

$$\eta = \arccos \frac{d_o}{d} \quad (4.21)$$

$$\left. \begin{array}{l} \gamma_{rd} = \gamma_{ro} - \eta \\ \alpha_{rd} = \alpha_{ro} + \eta \end{array} \right\} \quad (4.22)$$

Положив  $\eta_{\max} = \gamma_{ro}$ , из (4.21) получаем

$$d_{o \min} = d \cos \gamma_{ro}$$

Из (4.5)

$$h_{\max} = 0,5d(1 - \cos \gamma_{ro}) \quad (4.23)$$

**Пример 4.1.** Тангенциальным фасонным резцом из быстрорежущей стали, имеющим передний угол  $20^\circ$  в радиальной секущей плоскости, изготавливают профиль на заготовке с наружным диаметром 40 мм. Какую наибольшую высоту профиля можно выполнить этим резцом?

## Неортогональные фасонные резцы

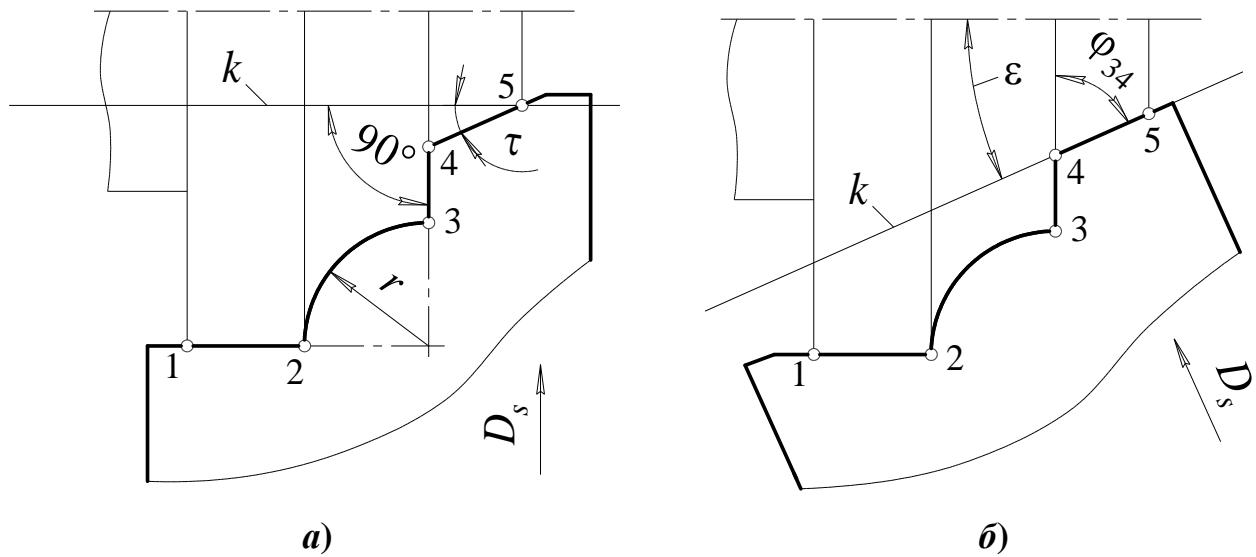


Рис. 4.13. Ортогональный (a) и неортогональный (б) фасонные резцы

| <i>i</i> | $\varphi_i$ |
|----------|-------------|
| 1        | 0           |
| 2        | 90          |
| 3        | 0           |
| 4        | 90          |
| 5        | $\tau$      |

| <i>i</i> | $\varphi_i$        |
|----------|--------------------|
| 1        | $\varepsilon$      |
| 2        | $90 - \varepsilon$ |
| 3        | $\varepsilon$      |
| 4        | $90 - \varepsilon$ |
| 5        | 0                  |

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \operatorname{tg} \alpha_{ri} \cos \varphi_i$$

$$\varphi_i = 90^\circ \Rightarrow \alpha_i = 0$$

## Особенности конструкции круглых фасонных резцов

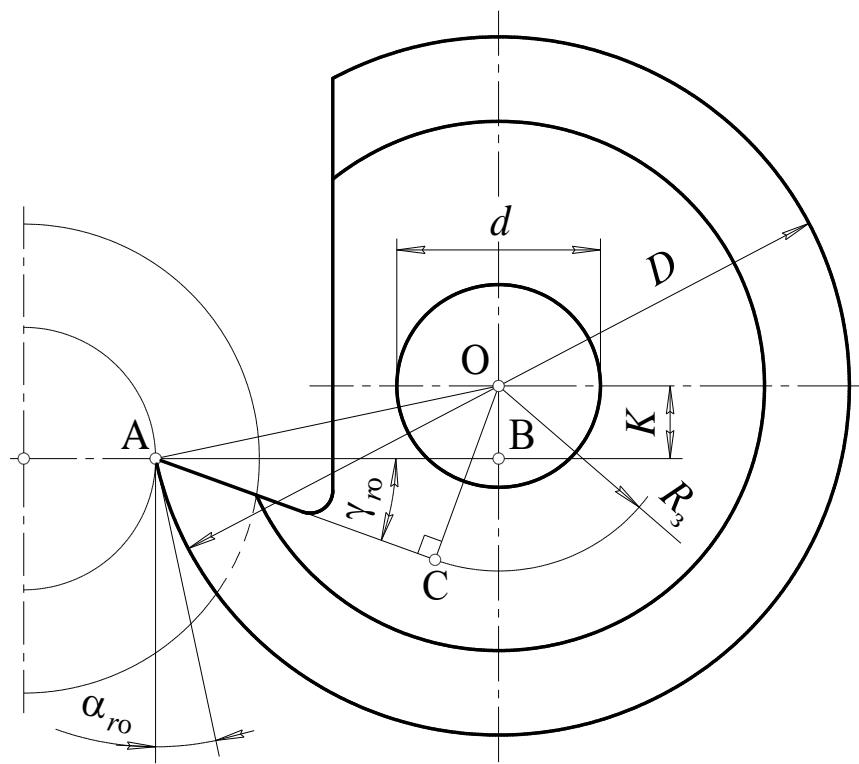


Рис. 4.14. Круглый фасонный резец

Из  $\Delta OAB$

$$K = 0,5D \sin \alpha_{ro} \quad (4.24)$$

Из  $\Delta OAC$

$$R_3 = 0,5D \sin(\gamma_{ro} + \alpha_{ro}) \quad (4.25)$$

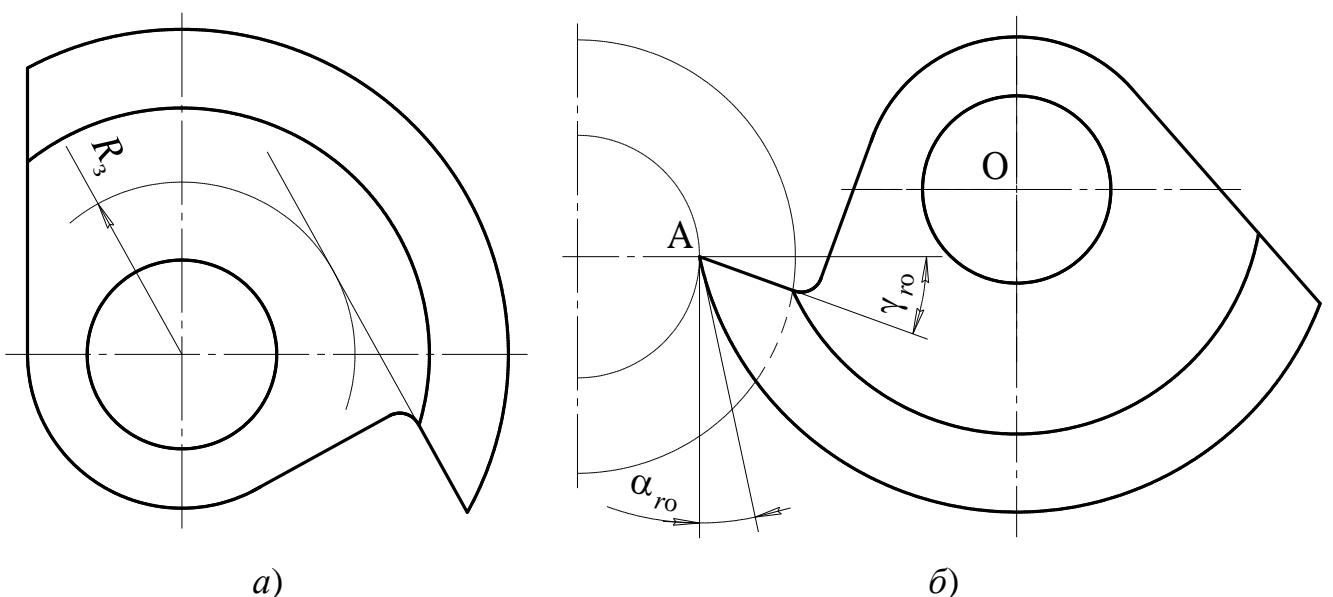


Рис. 4.15. Заточка (a) и установка (б) заточенного круглого резца

## 4.2. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ

### 4.2.1. Краткие сведения о резьбах

Основные параметры резьбы:

- наружный диаметр  $d$
- шаг  $p$
- число заходов  $k$
- угол профиля  $2\epsilon$

Таблица 4.2. Угол профиля стандартных резьб

| Резьба         | $2\epsilon$ , град. |
|----------------|---------------------|
| Метрическая    | 60                  |
| Трубная        | 55                  |
| Упорная        | 33                  |
| Трапецидальная | 30                  |

Высота теоретического профиля симметричных резьб (метрической, трубной, трапецидальной)

$$h = \frac{1}{2} p \operatorname{ctg} \epsilon \quad (4.26)$$

Средний и наружный диаметры резьб связаны соотношением:

- у метрической резьбы

$$d_{cp} = d - \frac{3}{4} h$$

- у трапецидальной резьбы

$$d_{cp} = d - \frac{1}{2} p$$

Угол подъема винтовой линии резьбы на среднем диаметре

$$\tau = \operatorname{arctg} \frac{pk}{\pi d_{cp}}$$

#### 4.2.2. Стержневые резьбовые резцы

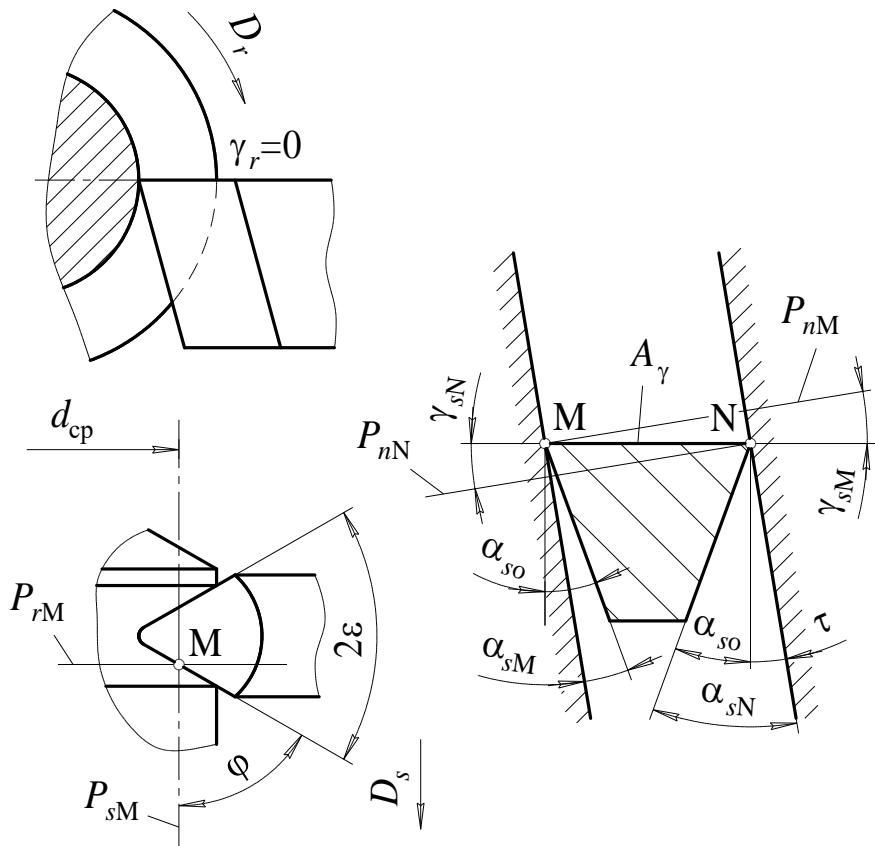


Рис. 4.16. Резьбовой резец I типа

У резца I типа

$$\gamma_{sM} > 0$$

$$\gamma_{sN} < 0$$

$$\alpha_{sM} = \alpha_{so} - \tau$$

$$\alpha_{sN} = \alpha_{so} + \tau$$

У резца II типа

$$\gamma_{sM} = \gamma_{sN} = 0$$

$$\alpha_{sM} = \alpha_{sN} = \alpha_{so}$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_1 = \operatorname{tg} \varepsilon \cos \tau$$

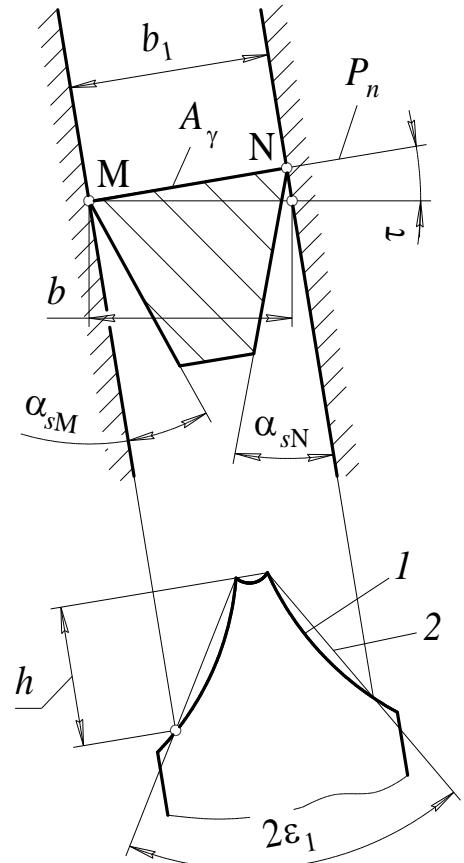
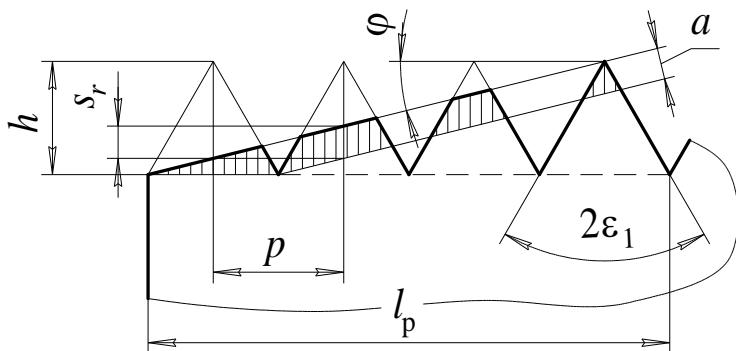


Рис. 4.17. Резьбовой резец II типа

### 4.2.3. Резьбовые гребёнки



$$s_r = p \tan \varphi \quad (4.27)$$

$$a = p \sin \varphi \quad (4.28)$$

$$\tan \epsilon_1 = \frac{h}{H} \tan \epsilon \quad (4.29)$$

Рис. 4.18. Режущая часть резьбовой гребёнки

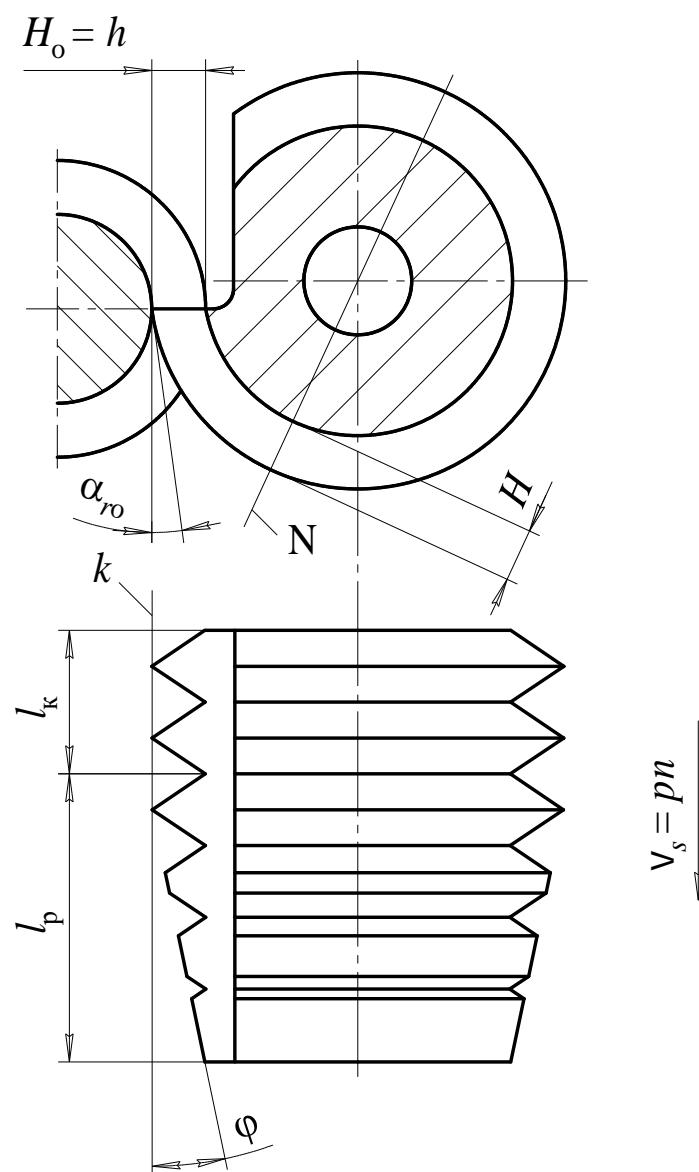


Рис. 4.19. Круглая резьбовая гребёнка

#### 4.2.4. Метчики

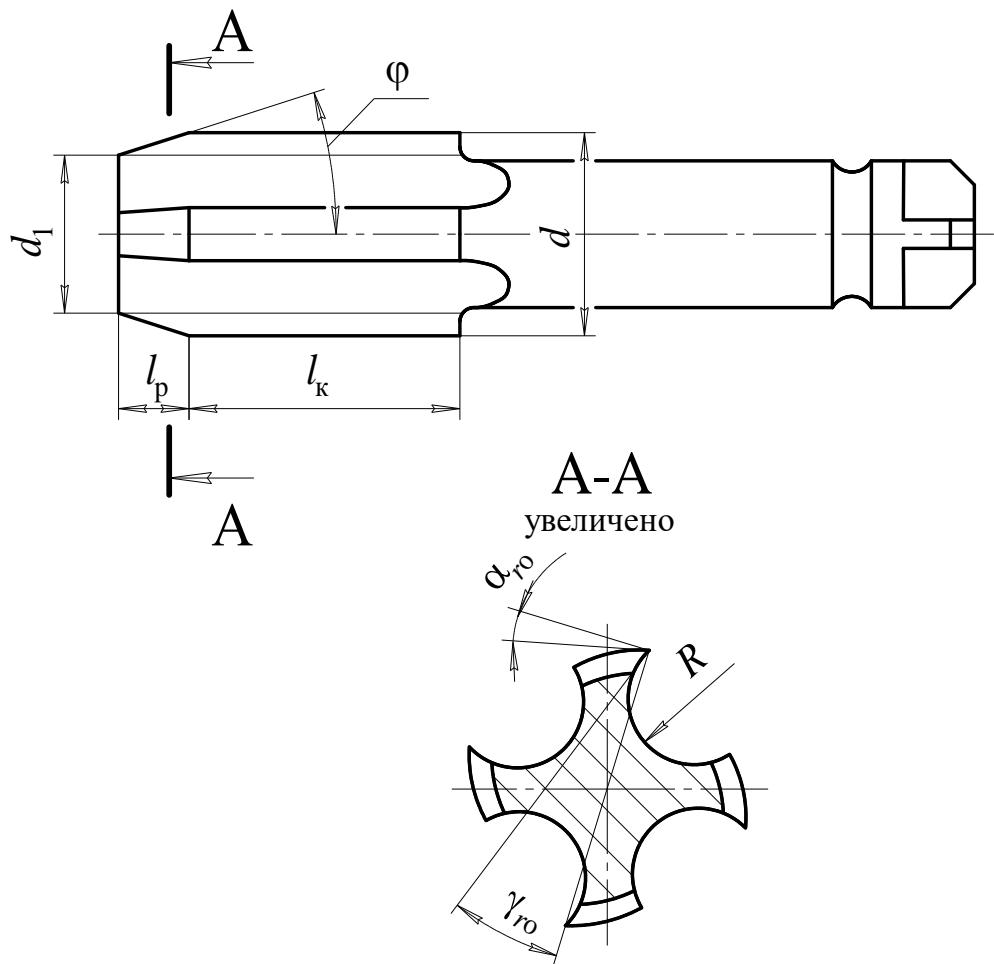


Рис. 4.20. Геометрические параметры метчика с прямыми канавками

$$s_z = \frac{p}{z} \operatorname{tg} \varphi \quad (4.30)$$

$$a_z = \frac{p}{z} \sin \varphi \quad (4.31)$$

Схемы снятия припуска комплектом метчиков:

- генераторная
- профильная

$$\beta_i = \frac{F_i}{F} \quad (4.32)$$

$$\sum_1^n \beta_i = 1,$$

$n$  – ЧИСЛО МЕТЧИКОВ В КОМПЛЕКТЕ

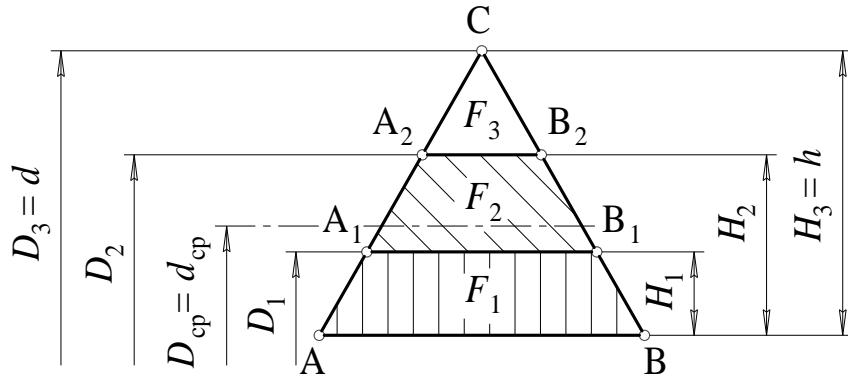


Рис. 4.21. Генераторная схема снятия припуска

Из  $\Delta A_1 B_1 C$  и  $\Delta ABC$

$$\frac{(h - H_1)^2}{h^2} = \frac{F - F_1}{F} = 1 - \frac{F_1}{F} = 1 - \beta_1$$

$$H_1 = h(1 - \sqrt{1 - \beta_1}) \quad (4.33)$$

Из  $\Delta A_2 B_2 C$  и  $\Delta ABC$

$$\frac{(h - H_2)^2}{h^2} = \frac{F - (F_1 + F_2)}{F} = 1 - (\beta_1 + \beta_2)$$

$$H_2 = h(1 - \sqrt{1 - (\beta_1 + \beta_2)}) \quad (4.34)$$

Для генераторной схемы

$$H_i = h \left( 1 - \sqrt{1 - \sum_1^i \beta_i} \right) \quad (4.35)$$

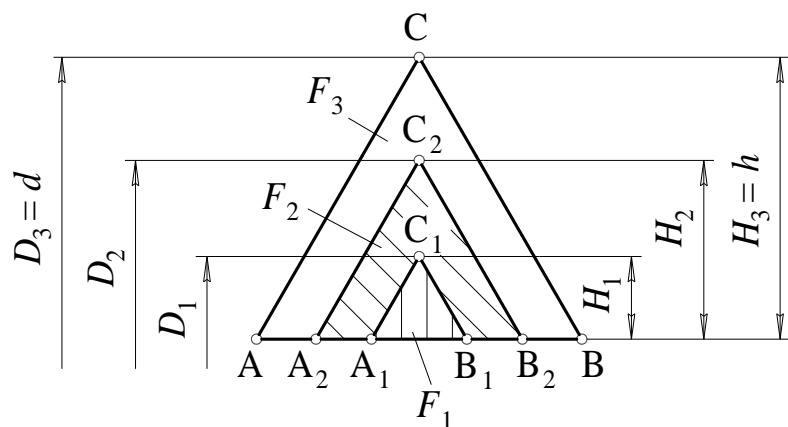


Рис. 4.22. Профильная схема снятия припуска

Из  $\Delta A_1B_1C$  и  $\Delta ABC$

$$\frac{H_1^2}{h^2} = \frac{F_1}{F} = \beta_1$$

$$H_1 = h\sqrt{\beta_1} \quad (4.36)$$

Из  $\Delta A_2B_2C$  и  $\Delta ABC$

$$\frac{H_2^2}{h^2} = \frac{F_1 + F_2}{F} = \beta_1 + \beta_2$$

$$H_2 = h\sqrt{\beta_1 + \beta_2} \quad (4.37)$$

Для профильной схемы

$$H_i = h\sqrt{\sum_1^i \beta_i} \quad (4.38)$$

$$D_i = d - 2(h - H_i) \quad (4.39)$$

**Пример 4.2.** Для нарезания резьбы  $M16 \times 1,5$  предполагается использовать комплект из 3-х метчиков, работающих по генераторной схеме. Первый метчик должен снять 50% припуска, а второй – 35%.

Какие номинальные наружные диаметры должны иметь метчики комплекта?

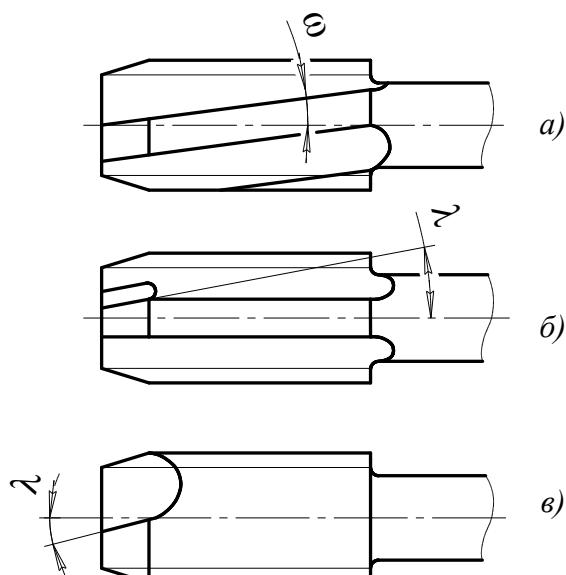


Рис. 4.23. Виды канавок метчиков

### 4.3. ПРОТЯЖКИ

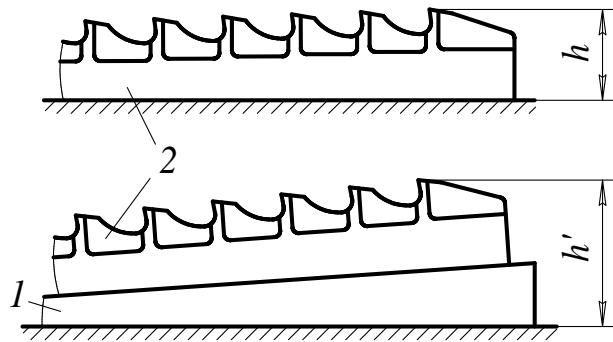


Рис. 4.24. Регулировка протяжки

Части протяжки:

- хвостовик
- передняя направляющая
- режущие зубья
- калибрующие зубья
- задняя направляющая

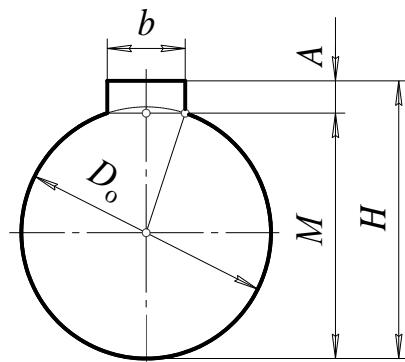


Рис. 4.25. К расчету припуска под протягивание паза

$$A = (D_{\max} - D_{\min})/2 \quad (4.40)$$

$$A = H_{\max} - M_{\min} \quad (4.41)$$

$$M = (D_o + \sqrt{D_o^2 - b^2})/2$$

$$M_{\min} = (D_{\min} + \sqrt{D_{\min}^2 - b_{\max}^2})/2 \quad (4.42)$$

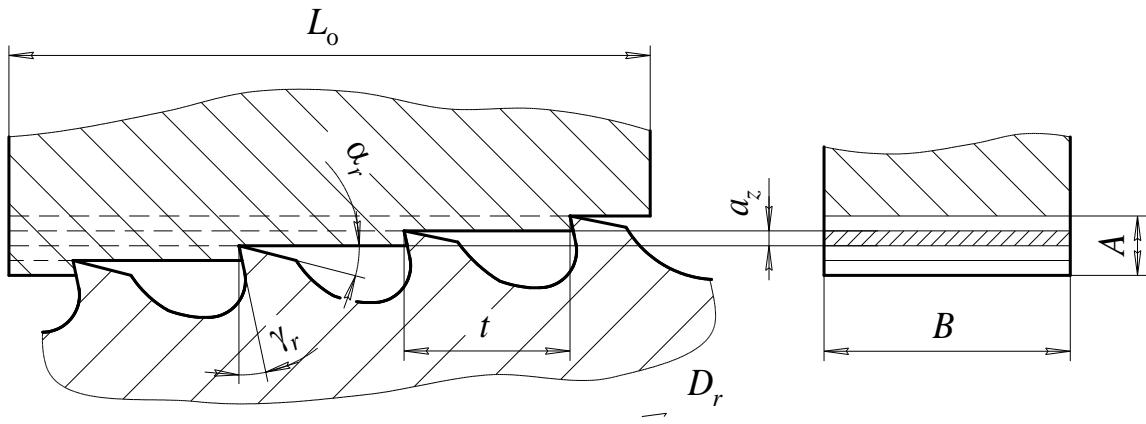


Рис. 4.26. Одинарная схема резания при протягивании

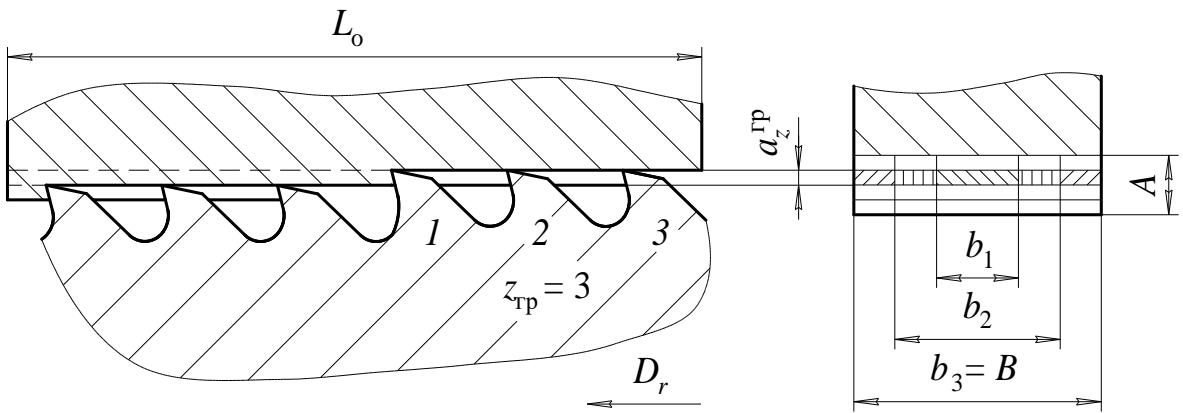


Рис. 4.27. Групповая схема резания при протягивании

$$z' = 1 \div 4$$

$$a_z' \leq 0,5a_z \quad (4.43)$$

### Баланс припуска

– при одинарной схеме резания

$$A = a_z(z - 1) + a_z'z' \quad (4.44)$$

$$z = \frac{A - a_z'z'}{a_z} + 1 \quad (4.45)$$

– при групповой схеме резания

$$A = m a_{\text{tp}} + a_z'z' \quad (4.46)$$

$$z = \frac{A - a_z'z'}{a_{\text{tp}}} z_{\text{tp}} + 1. \quad (4.47)$$

**Пример 4.3.** Круглая протяжка одинарной схемы резания имеет подъем черновых зубьев  $0,048$  мм и предназначена для обработки отверстия  $\varnothing 32^{+0,025}$  в заготовке с предварительно изготовленным отверстием  $\varnothing 30,5 \pm 0,1$ .

Какое минимальное число режущих зубьев имеет протяжка?

Из (4.40):  $A = 0,8125$  мм.

Разделим  $A$  на  $a_z$ , чтобы найти число черновых зубьев, снимающих припуск (без учета первого зуба):  $[A/a_z] = [16,927] \Rightarrow z - 1 = 16; z = 17$ .

Из (4.44):  $a'_z z' = A - a_z(z-1) = 0,0445$  мм.

Нельзя ограничиться одним чистовым зубом (принять  $z' = 1$ ). В этом случае получится, что  $a'_z = 0,0445 > 0,5a_z = 0,024$ , т.е. не будет выполняться условие (4.43).

Условие (4.43) выполняется при  $z' \geq 2$ , следовательно, минимальное число режущих зубьев протяжки  $z_p = z + z' = 19$ .

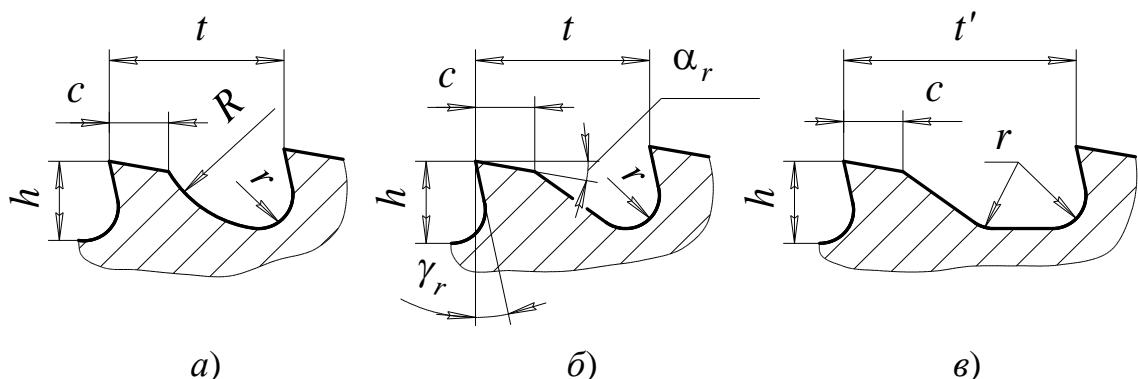


Рис. 4.28. Стружечные канавки протяжек

Таблица 4.3. Стандартные параметры стружечных канавок, мм

| $t$ | $h$ | $c$ | $r$  | $R$ | $F_k, \text{мм}^2$ | $t$ | $h$ | $c$ | $r$ | $R$ | $F_k, \text{мм}^2$ |
|-----|-----|-----|------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| 8   | 2,5 | 3   | 1,25 | 5   | 4,91               | 14  | 3   | 4   | 1,5 | 10  | 7,07               |
|     | 3   |     | 1,5  |     | 7,07               |     | 4   |     | 2   |     | 12,57              |
|     | 4   |     | 2    | 7   | 12,57              |     | 5   |     | 2,5 |     | 19,63              |
|     |     |     |      |     |                    |     | 6   |     | 3   |     | 28,27              |

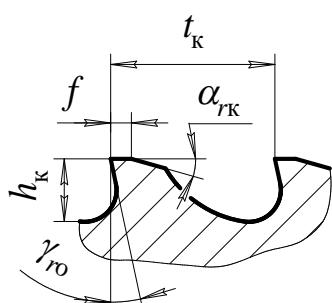


Рис. 4.29. Калибрующий зуб протяжки

Таблица 4.4. Количество калибрующих зубьев протяжек

| Квалитет точности | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | св. 10 |
|-------------------|---|---|---|---|----|--------|
| $z_k$             | 8 | 7 | 6 | 5 | 4  | 2÷3    |

$$t_k \approx \frac{2}{3}t$$

## Усилие протягивания

$$P_{\text{т}} = \sum_{i=1}^q P_{zi}, \text{Н} \quad (4.48)$$

$$q = \left[ \frac{L_o}{t} + 1 \right] \quad (4.49)$$

$$P_{zi} = b_i p_z, \text{Н} \quad (4.50)$$

$$p_z = C_p \sigma_{\text{в}} a^{0,85} K_{\gamma}, \text{Н/мм} \quad (4.51)$$

$$C_p = \begin{cases} 2,0 & \text{алюминий и медные сплавы} \\ 2,6 & \text{чугун} \\ 3,3 & \text{углеродистые стали} \\ 4,3 & \text{легированные стали} \end{cases}$$

$$K_{\gamma} = \frac{90 - \gamma_{ro}}{75} \quad (4.52)$$

## Технические ограничения

– по помещаемости стружки в стружечной канавке

$$a \leq \frac{F_{\text{k}}}{KL_o} \quad (4.53)$$

$$K = \begin{cases} 2,0 \dots 2,5 & \text{чугун и медные сплавы} \\ 3,5 \dots 4,0 & \text{сталь и алюминий} \end{cases}$$

– по прочности режущей части протяжки

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{P_{\text{т}}}{F_1} \leq [\sigma_{\text{и}}], \text{МПа} \quad (4.54)$$

$$F_1 = \frac{\pi}{4} (D_o - 2h)^2, \text{мм}^2 \quad (4.55)$$

– по прочности хвостовой части протяжки

$$\sigma_{\text{x}} = \frac{P_{\text{т}}}{F_{\text{x}}} \leq [\sigma_{\text{x}}], \text{МПа} \quad (4.56)$$

– по предельной длине протяжки

$$L_{\text{max}} \leq \psi D, \text{мм} \quad (4.57)$$