



# **Лекция. Силы при обработке материалов резанием**

Составитель: Мухина М.В.

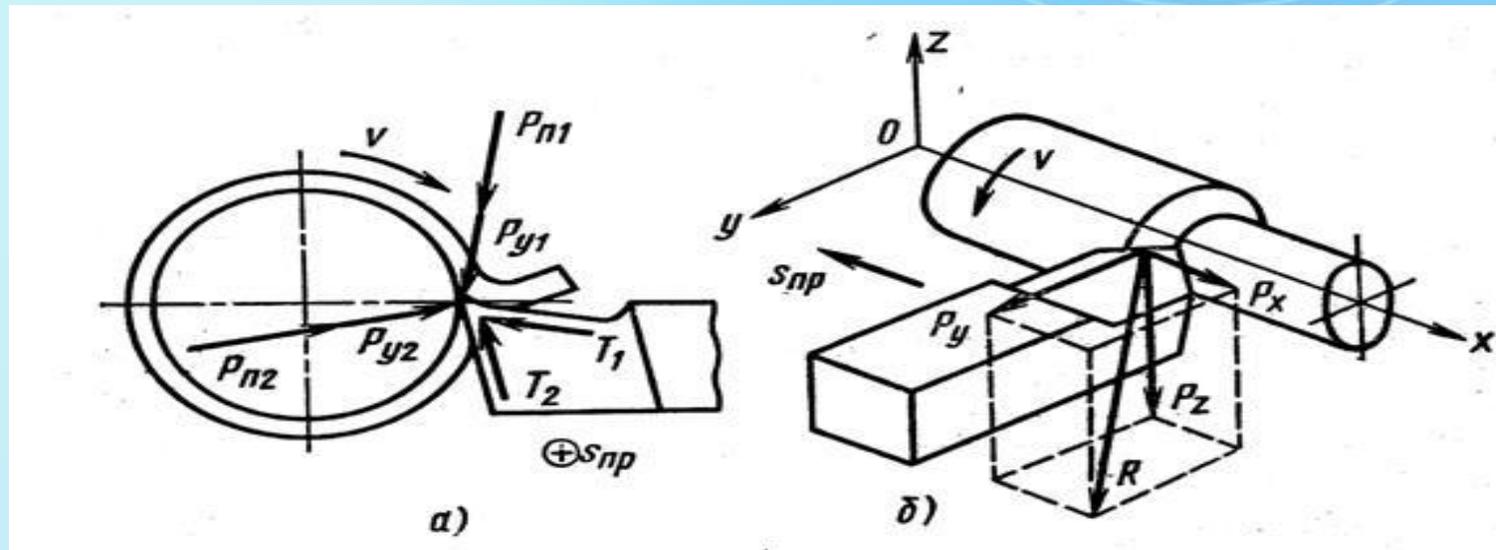
# Система сил, действующих в процессе резания

- При обработке резанием металл оказывает сопротивление режущему инструменту.
- Это сопротивление преодолевается силой резания, приложенной к передней поверхности инструмента.
- Сила резания затрачивается на отрыв элемента стружки от основной массы металла и его деформацию, а также на преодоление трения стружки о переднюю поверхность резца и задней поверхности резца о поверхность резания.

# В результате сопротивления металла процессу деформирования возникают реактивные силы, действующие на режущий инструмент

Это силы упругого ( $P_{y1}$  и  $P_{y2}$ ) и пластического ( $P_{n1}$  и  $P_{n2}$ ) деформирования, векторы которых направлены перпендикулярно к передней и главной задней поверхностям инструмента. Наличие нормальных сил обуславливает возникновение сил трения  $T_1$  и  $T_2$ , направленных по передней и главной задней поверхностям инструмента. Всю указанную систему сил приводят к равнодействующей силе резания:

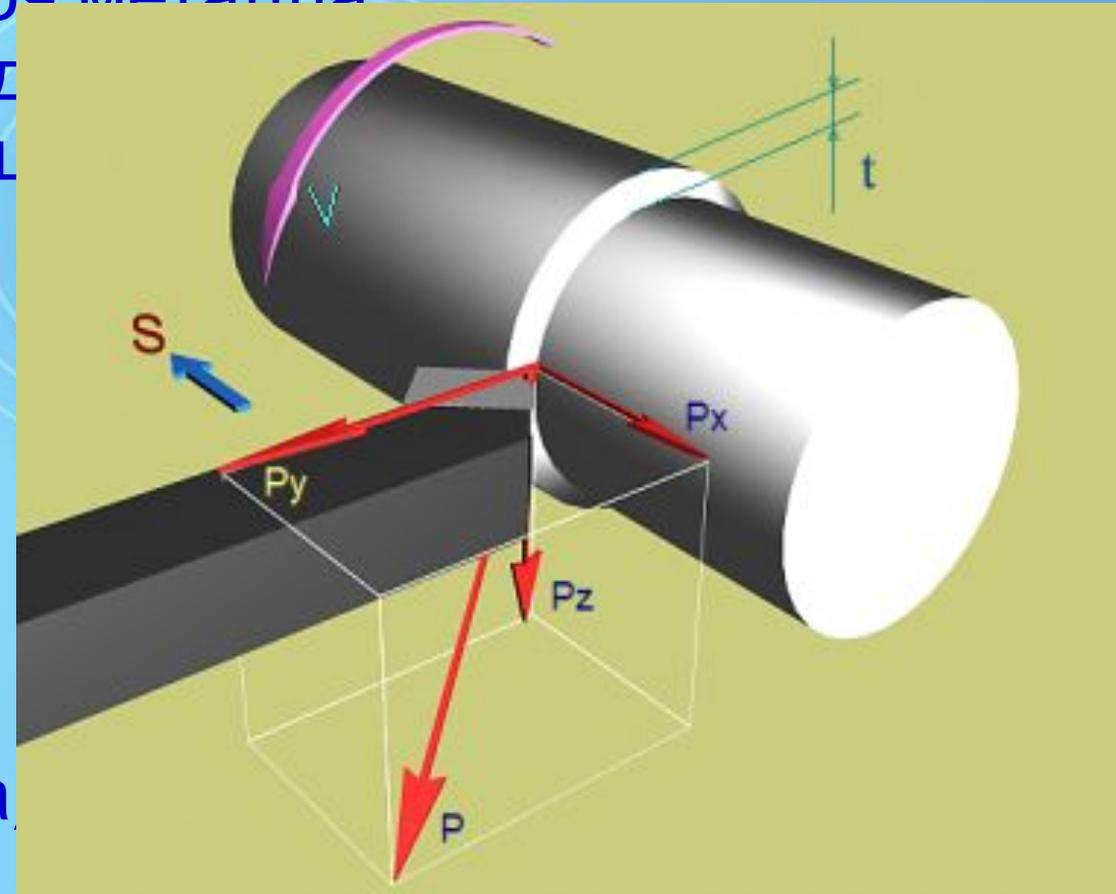
$$\bar{R} = \bar{P}_{y1} + \bar{P}_{y2} + \bar{P}_{n1} + \bar{P}_{n2} + \bar{T}_1 + \bar{T}_2$$



Точка приложения силы  $R$  находится на рабочей части главной режущей кромки инструмента. Абсолютная величина, точка приложения и направление в пространстве силы  $R$  под влиянием ряда факторов (неоднородность структуры и твердости заготовки, непостоянство срезаемого слоя металла и др.) являются переменными. Поэтому для расчетов используют не равнодействующую силу резания  $R$ , а ее составляющие, действующие по трем взаимно перпендикулярным направлениям –  $P_x, P_y, P_z$ .

Для токарной обработки

- ось  $X$  – линия центров станка;
- ось  $Y$  – горизонтальная линия, перпендикулярная линии центров станка;
- ось  $Z$  – линия, перпендикулярная плоскости  $XOY$



# Вертикальная составляющая силы резания

- Сила  $P_z$  – вертикальная составляющая силы резания или просто сила резания. Действует в плоскости резания в направлении главного движения. По силе  $P_z$  определяют крутящий момент на шпинделе станка, эффективную мощность резания, деформацию изгиба заготовки в плоскости  $XOZ$ , изгибающий момент, действующий на стержень резца, а также ведут динамический расчет механизмов коробки скоростей станка.

# Радиальная составляющая силы резания

- Сила  $P_U$  – радиальная составляющая силы резания. Действует перпендикулярно оси обрабатываемой заготовки в плоскости ХОУ. По силе  $P_U$  определяют величину упругого отжатия резца от заготовки, ведут расчет технологической системы на жесткость. Сила  $P_U$  стремится оттолкнуть резец от заготовки и деформировать ее. Учитывается при расчете прочности станины и суппорта, способствует появлению вибраций.

# Осевая составляющая силы резания

- Сила  $P_X$  – осевая составляющая силы резания. Действует вдоль оси заготовки параллельно направлению продольной подачи. По силе  $P_X$  рассчитывают механизм подачи станка, а также изгибающий момент, действующий на стержень резца.
- Равнодействующая силы резания определяется как диагональ параллелепипеда, построенного на составляющих силах:

$$R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}$$

# Определение силы резания

Каждая из составляющих силы резания определяется по эмпирическим формулам вида:  $P_z = C_{Pz} t^{X_{Pz}} S^{Y_{Pz}} V^{n_{Pz}} K_{M_{Pz}}$ , Н

где  $C_{Pz}$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки;

$K_{M_{Pz}}$  — коэффициент, учитывающий факторы, не вошедшие в формулу (величины углов резца, материал резца и др.)

$t$  — глубина резания, мм;

$S$  — подача, мм/об;

$V$  — скорость резания, м/мин;

$X_{Pz}, Y_{Pz}, n_{Pz}$  — показатели степеней.

- При  $\phi = 45$  ,  $\gamma = 15$  ,  $\lambda = 0$  между составляющими силы резания имеется соотношение:  $P_z = 1$  ,  $P_y = (0,25 - 0,5) P_z$  ,  $P_x = (0,1 - 0,25) P_z$  .
- Из этих соотношений следует, что сила  $P_z$  является главной составляющей силы резания и мало отличается по величине от равнодействующей силы  $R$  , что позволяет многие практические расчеты производить не по силе  $P$  резания, а по тангенциальной ее составляющей  $P_z$ .

Крутящий момент на шпинделе станка:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D_{заг}}{2 \cdot 1000} , \text{ н} \cdot \text{м} ,$$

где  $D_{заг}$  – диаметр заготовки, мм

# Эффективная мощность

- Эффективной мощностью  $N_e$  называют мощность, расходуемую на процесс деформирования и срезания с заготовки слоя металла. При точении цилиндрической поверхности на токарно-винторезном станке эффективная мощность  $N_e = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_x \cdot n \cdot S_{np}}{60 \cdot 10^6}$ , кВт
- где  $n$  – частота вращения заготовки, об/мин

# Величина мощности

Величина мощности от силы  $P_z$  составляет 1-2% от всей мощности. Поэтому ею пренебрегают и мощность  $N_e$  определяют по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 10^3}, \text{ кВт}$$

Мощность, расходуемая электродвигателем

$$N_э = \frac{N_e}{\eta},$$

где  $\eta$  - к.п.д. станка, равный 0,7 – 0,8.

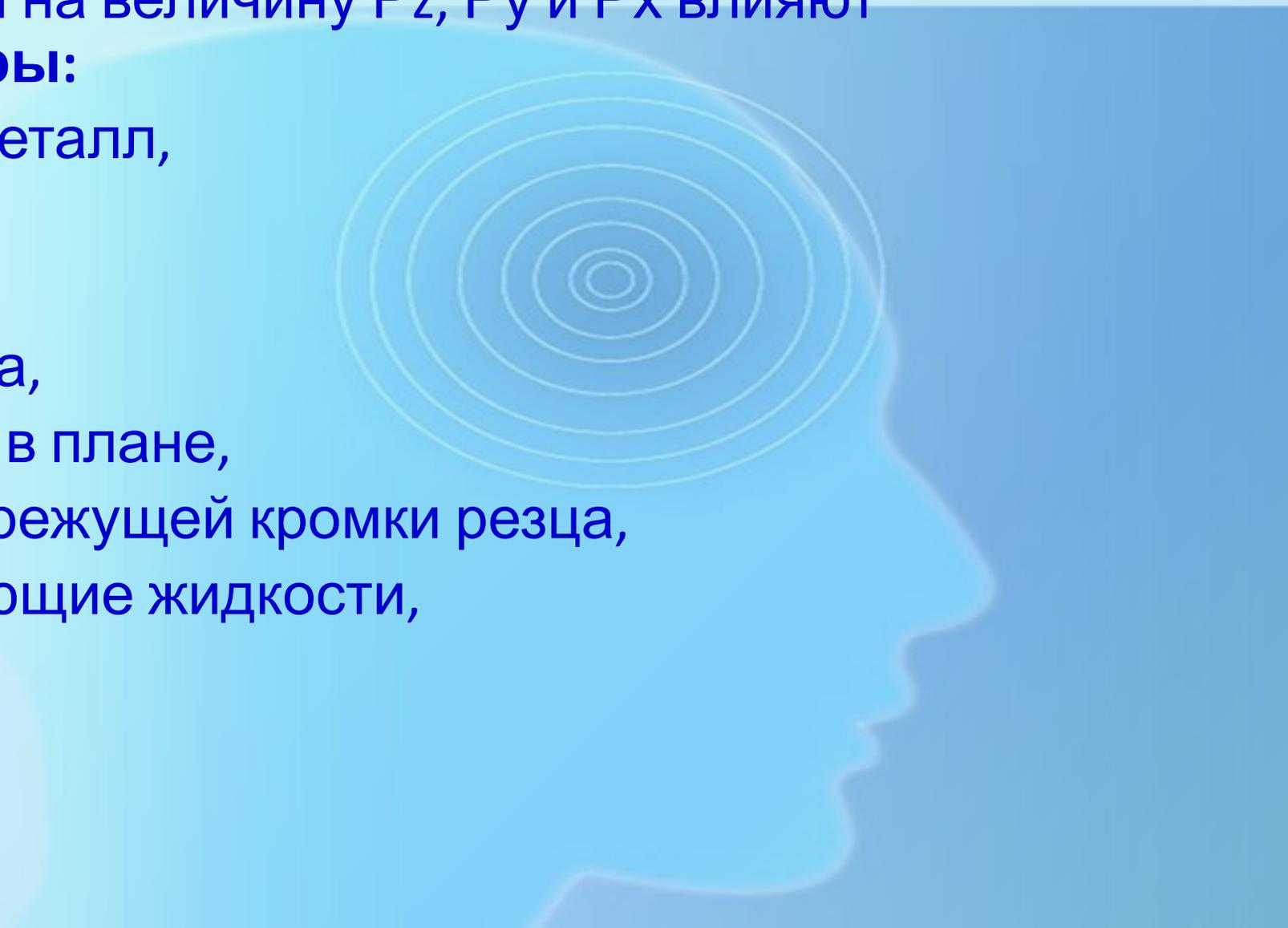
- Для осуществления процесса резания необходимо чтобы

$$N_{\text{э}} \leq N_{\text{ст.}}$$

- Если данное условие не выполняется, то необходимо:
  1. Уменьшить частоту вращения, перейдя на ближайшее меньшее её значение по паспорту станка.
  2. «Разбить» глубину резания на несколько проходов (2 или более).
  3. Выбрать более мощный станок.

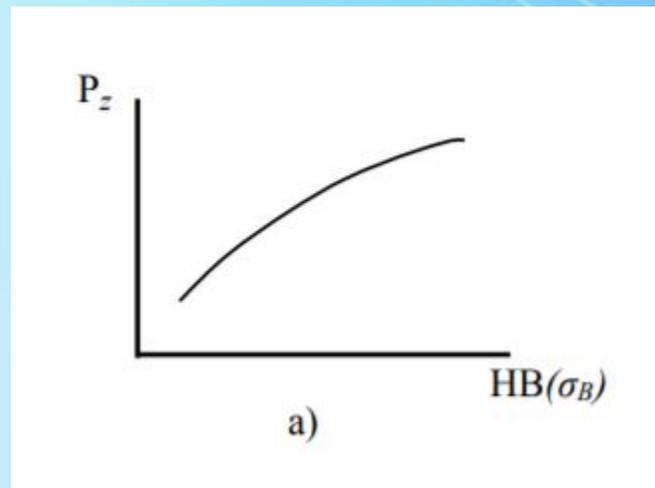
# Факторы, влияющие на величину $P_z$ , $P_y$ и

$P_x$

- В процессе резания на величину  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  влияют следующие **факторы**:
  - обрабатываемый металл,
  - глубина резания,
  - подача,
  - передний угол резца,
  - главный угол резца в плане,
  - радиус скругления режущей кромки резца,
  - смазочно-охлаждающие жидкости,
  - скорость резания,
  - износ резца.
- 

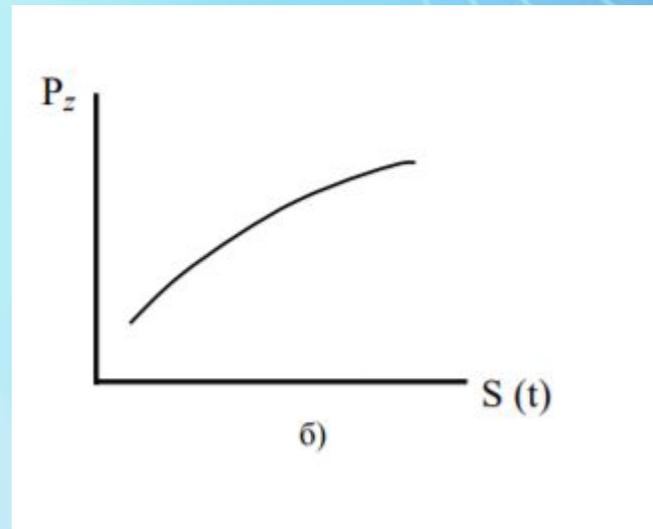
# Физико-механические свойства

- Физико-механические свойства обрабатываемого металла существенно влияют на величину силы резания. Чем больше предел прочности при растяжении и твердость обрабатываемого металла, тем больше  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ .



# Влияние глубины резания и подачи

- Увеличение глубины резания и подачи также приводит к увеличению составляющих силы резания, причем глубина резания больше влияет на силу резания, чем подача



# Влияние переднего угла, главного угла в плане

- Чем меньше передний угол  $\gamma$  или чем больше угол резания, тем больше сила резания.
- При увеличении главного угла в плане  $\phi$  сила  $P_y$  резко уменьшается, а сила  $P_x$  увеличивается.

# Влияние радиуса скругления, СОЖ, скорости

- При увеличении радиуса скругления  $r$  режущих кромок при вершине резца силы  $P_z$  и  $P_y$  возрастают, а  $P_x$  уменьшается.
- Смазочно-охлаждающие жидкости уменьшают силу  $P_z$  при тонких срезах, при увеличении толщины среза и скорости резания эффект от применения СОЖ уменьшается.
- Увеличение скорости резания от 50 до 400-500 м/мин приводит к эффективному уменьшению силы  $P_z$ , при скорости  $V > 500$  м/мин уменьшение  $P_z$  незначительно.

# Влияние скорости резания и инструментального материала

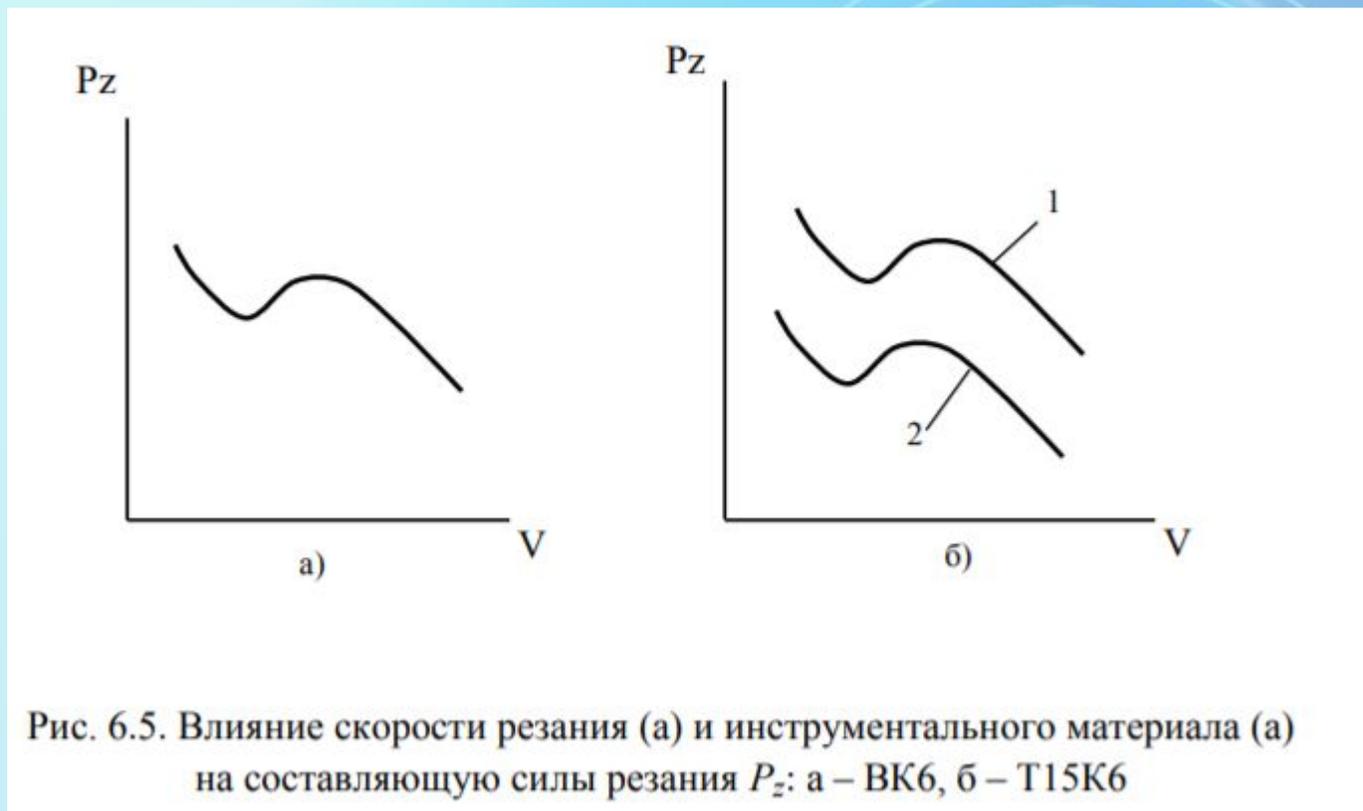


Рис. 6.5. Влияние скорости резания (а) и инструментального материала (а) на составляющую силы резания  $P_z$ : а – BK6, б – T15K6

# Влияние износа, режущей части резца

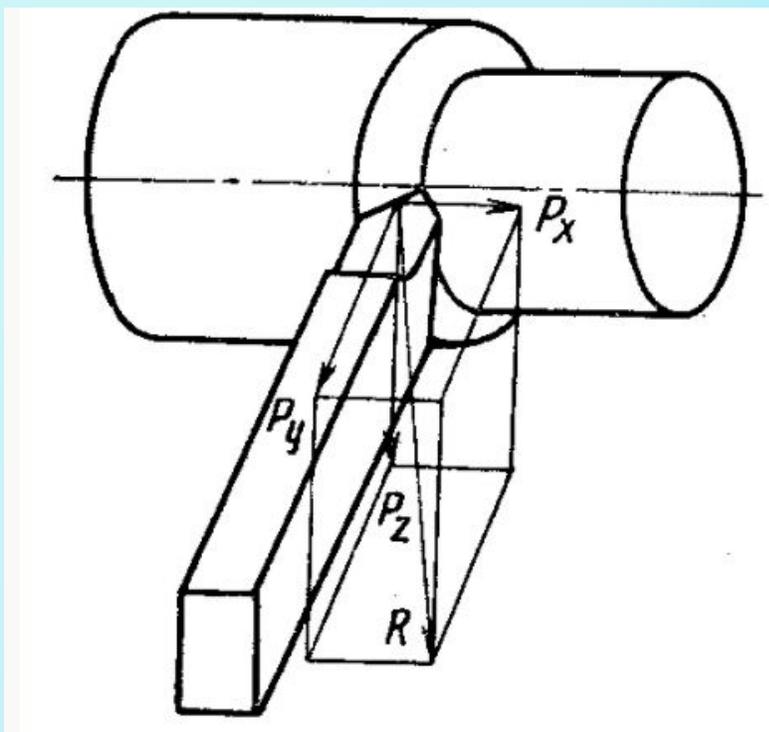
- Возрастание износа по задней поверхности незначительно увеличивает  $P_y$  и  $P_x$ .
- Сила резания зависит от материала режущей части резца. При обработке твердосплавными резцами силы резания несколько меньше, чем резцами из быстрорежущей стали.

# ЗАДАЧА

Определить силы резания  $P_{z'}$ ,  $P_{y'}$ ,  $P_{x'}$  при продольном точении заготовки из углеродистой стали 40 с пределом прочности  $\sigma_B = 650$  МПа резцом с пластинкой из твердого сплава Т5К10. Глубина резания  $t = 4$  мм; подача  $S = 0,6$  мм/об; скорость резания  $V = 110$  м/мин. Геометрические параметры резца: форма передней поверхности – радиусная с фаской;  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi_1 = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\lambda = 5^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $r = 1$  мм.

# РЕШЕНИЕ

- При токарной обработке в условиях несвободного резания на резец действует противодействующая сила  $\mathbf{P}$  (Рис.2), которую можно разложить на три взаимно перпендикулярные силы:



$\mathbf{P}_z$  – тангенциальная сила;

$\mathbf{P}_y$  – радиальная сила, действующая на механизм поперечной подачи;

$\mathbf{P}_x$  – осевая сила, или сила продольной подачи;

Все эти силы зависят от многих факторов и рассчитываются по эмпирическим формулам:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^{X_{pz}} \cdot S^{Y_{pz}} \cdot K_{P_z} \cdot V^{n_{pz}}$$

$$P_y = C_{P_y} \cdot t^{X_{py}} \cdot S^{Y_{py}} \cdot K_{P_y} \cdot V^{n_{py}}$$

$$P_x = C_{P_x} \cdot t^{X_{px}} \cdot S^{Y_{px}} \cdot K_{P_x} \cdot V^{n_{px}}$$

- где  $C_{P_z}$ ,  $C_{P_y}$ ,  $C_{P_x}$ , - постоянные коэффициенты, характеризующие свойства обрабатываемого материала и другие факторы;
- $t$ - глубина резания в мм;
- $S$  - подача в мм/об;
- $V$  - скорость резания в м/мин.
- $X_{pz}$ ,  $X_{py}$ ,  $X_{px}$ ,  $Y_{pz}$ ,  $Y_{py}$ ,  $Y_{px}$ ,  $n_{pz}$ ,  $n_{py}$ ,  $n_{px}$  – показатели степеней, характеризующие закон изменения составляющих сил резания в зависимости от глубины резания, подачи и скорости резания.
- $K_{P_z}$ ,  $K_{P_y}$ ,  $K_{P_x}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие конкретные условия резания.

При вычислении сил поправочные коэффициенты и показатели степеней следует назначать по справочнику (Таблица 18 П)



1. Из справочника выписываем коэффициенты и показатели степеней для заданных условий обработки:

- $C_{PZ}=300; X_{PZ}=1; Y_{PZ}=0,75; n_{PZ}=-0,15;$
- $C_{PY}=243; X_{PY}=0,9; Y_{PY}=0,6; n_{PY}=-0,3;$
- $C_{PX}=339; X_{PX}=1; Y_{PX}=0,5; n_{PX}=-0,4;$

- Отличие заданных условий обработки от нормативных должно быть учтено при подсчете сил резания путем введения соответствующих поправочных коэффициентов. Поправочные коэффициенты на **характеристики механических свойств обрабатываемого материала** и на зависимость от геометрических элементов резца находим по справочнику.
- Приведенные выше значения коэффициентов  $C_p$  и показателей степеней  $X_p, Y_p, n_p$  действительны лишь для точения стали с  $\sigma_B = 750$  МПа резцом из твердого сплава с углом  $\varphi = 45^\circ, \gamma = 10^\circ, \lambda = 0$ , так как только для этих условий обработки каждый поправочный коэффициент равен единице. Поэтому вводим следующие поправочные коэффициенты для заданных условий обработки (Таблица 9):

**на характеристику механических свойств обрабатываемой стали с  $\sigma_B = 650$  МПа**

- $K_{MPz} = (\sigma_B / 750)^{n_p}; n_p = 0,75; K_{MPx} = (\sigma_B / 750)^{n_p}; n_p = 1;$
- $K_{MPz} = (650/750)^{0,75} = 0,87^{0,75} = 0,9; K_{MPx} = (650/750) = 0,87.$
- $K_{...} = (\sigma_B / 750)^{n_p}; n_p = 1,35;$

**9. Поправочный коэффициент  $K_{MP}$  для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости**

| Обрабатываемый материал   | Расчетная формула                              | Показатель степени $n$ при определении                |   |  |
|---|--|---|---|--|
|   |  | составляющей $P_z$ силы резания при обработке резцами | крутящего момента $M$ и осевой силы $P_0$ при сверлении, рассверливании и зенкеро-вании | окружной силы резания $P_z$ при фрезеровании |
| Конструкционная углеродистая и легированная сталь $\sigma_B$ , МПа<br>$\leq 600$<br>$> 600$ | $K_{MP} = \left(\frac{\sigma_B}{750}\right)^n$ | 0,75/0,35   | 0,75/0,75   | 0,3/0,3                                      |
|   |  | 0,75/0,75   | 0,75/0,75   | 0,3/0,3                                      |
| Серый чугун   | $K_{MP} = \left(\frac{HB}{190}\right)^n$       | 0,4/0,55  | 0,6/0,6   | 1,0/0,55                                     |
| Ковкий чугун  | $K_{MP} = \left(\frac{HB}{150}\right)^n$       | 0,4/0,55  | 0,6/0,6   | 1,0/0,55                                     |

Примечание В числителе приведены значения показателя степени  $n$  для твердого сплава, в знаменателе – для быстрорежущей стали

# зависимость от геометрических элементов резца

Данные берем из таблицы 21 П:  
на главный угол в плане  $\varphi = 60^\circ$ .

- $K_{\varphi Pz} = 0,94$ ;  $K_{\varphi Py} = 0,77$ ;  $K_{\varphi Px} = 1,11$ ;

на угол наклона главной режущей кромки  $\lambda = +5^\circ$ .

- $K_{\lambda Pz} = 1$ ;  $K_{\lambda Py} = 1,25$ ;  $K_{\lambda Px} = 0,85$ .

Таблица 21П. Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента на составляющие силы резания при обработке стали и чугуна

| Параметр                                       |          | Материал режущей части резца | Поправочный коэффициент |                      |                  |              |
|--|----------|------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------|--------------|
| Наименование                                   | Величина |                              | Обозначение             | для составляющей     |                  |              |
|  |          |                              |                         | тангенциальной $P_z$ | радиальной $P_v$ | осевой $P_x$ |
| Главный угол в плане $\varphi$ , град          | 30       | Твердый сплав                | $K_{\varphi p}$         | 1,08                 | 1,30             | 0,78         |
|  | 45       |                              |                         | 1,00                 | 1,00             | 1,00         |
|  | 80       |                              |                         | 0,94                 | 0,77             | 1,11         |
|  | 90       |                              |                         | 0,89                 | 0,50             | 1,17         |
|  | 30       | Быстрорежущая сталь          |                         | 1,08                 | 1,63             | 0,70         |
|  | 45       |                              |                         | 1,00                 | 1,00             | 1,00         |
|  | 60       |                              |                         | 0,08                 | 0,71             | 1,27         |
|  | 90       |                              |                         | 1,08                 | 0,44             | 1,82         |
| Передний угол $\gamma$ , град.                 | -15      | Твердый сплав                | $K_{\gamma p}$          | 1,25                 | 2,0              | 2,0          |
|  | 0        |                              |                         | 1,10                 | 1,4              | 1,4          |
|  | 10       |                              |                         | 1,00                 | 1,0              | 1,0          |
|  | 12-15    | Быстрорежущая сталь          |                         | 1,15                 | 1,6              | 1,7          |
|  | 20-25    |                              |                         | 1,00                 | 1,0              | 1,0          |
| Угол наклона главного лезвия $\lambda$ , град. | -5       | Твердый сплав                | $K_{\lambda p}$         |                      | 0,75             | 1,07         |
|  | 0        |                              |                         | 1,00                 | 1,00             | 1,00         |
|  | 5        |                              |                         |                      | 1,25             | 0,85         |
|  |          |                              |                         |                      | 1,70             | 0,65         |
|  | 15       |                              |                         |                      |                  |              |
| Радиус при вершине $r$ , мм                    | 0,5      | Быстрорежущая сталь          | $K_{rp}$                | 0,87                 | 0,66             |              |
|  | 1,0      |                              |                         | 0,93                 | 0,82             |              |
|  | 2,0      |                              |                         | 1,00                 | 1,00             | 1,0          |
|  | 3,0      |                              |                         | 1,04                 | 1,14             |              |
|  | 5,0      |                              |                         | 1,10                 | 1,35             |              |

- 3. Определяем составляющую силу  $P_z$ , имея в виду, что общий поправочный коэффициент  $K_{Pz} = K_{MPz} \cdot K_{\phi Pz} \cdot K_{\lambda Pz}$ :
- $P_z = 10 \cdot C_{Pz} \cdot t^{X_{pz}} \cdot S_0^{Y_{pz}} \cdot V^{n_P} \cdot K_{MPz} \cdot K_{\phi Pz} \cdot K_{\lambda Pz} = 10 \cdot 300 \cdot 4 \cdot 0,6^{0,75} \cdot 110^{0,15} \cdot 0,9 \cdot 0,94 \cdot 1 = 3417 \text{ Н}.$
- 4. Определяем составляющую силу  $P_y$ :
- $P_y = 10 \cdot 243 \cdot 4^{0,9} \cdot 0,6^{0,6} \cdot 110^{-0,3} \cdot 0,83 \cdot 0,77 \cdot 1,25 = 1220 \text{ Н}.$
- 5. Определяем составляющую силу  $P_x$ :
- $P_x = 10 \cdot 339 \cdot 4 \cdot 0,6^{0,5} \cdot 110^{-0,4} \cdot 0,87 \cdot 1,11 \cdot 0,85 = 1308 \text{ Н}.$

# ЗАДАЧА

Определить силы резания  $P_{z'}$ ,  $P_{y'}$ ,  $P_{x'}$  при продольном точении заготовки из серого чугуна СЧ НВ 160 резцом с пластинкой из твердого сплава Т15К6. Глубина резания  $t = 2,5$  мм; подача  $S = 0,78$  мм/об; скорость резания  $V = 60$  м/мин. Геометрические параметры резца: форма передней поверхности – радиусная с фаской;  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi_1 = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\lambda = 10^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $r = 1$  мм.