



Лекция. Силы при обработке материалов резанием

Составитель: Мухина М.В.

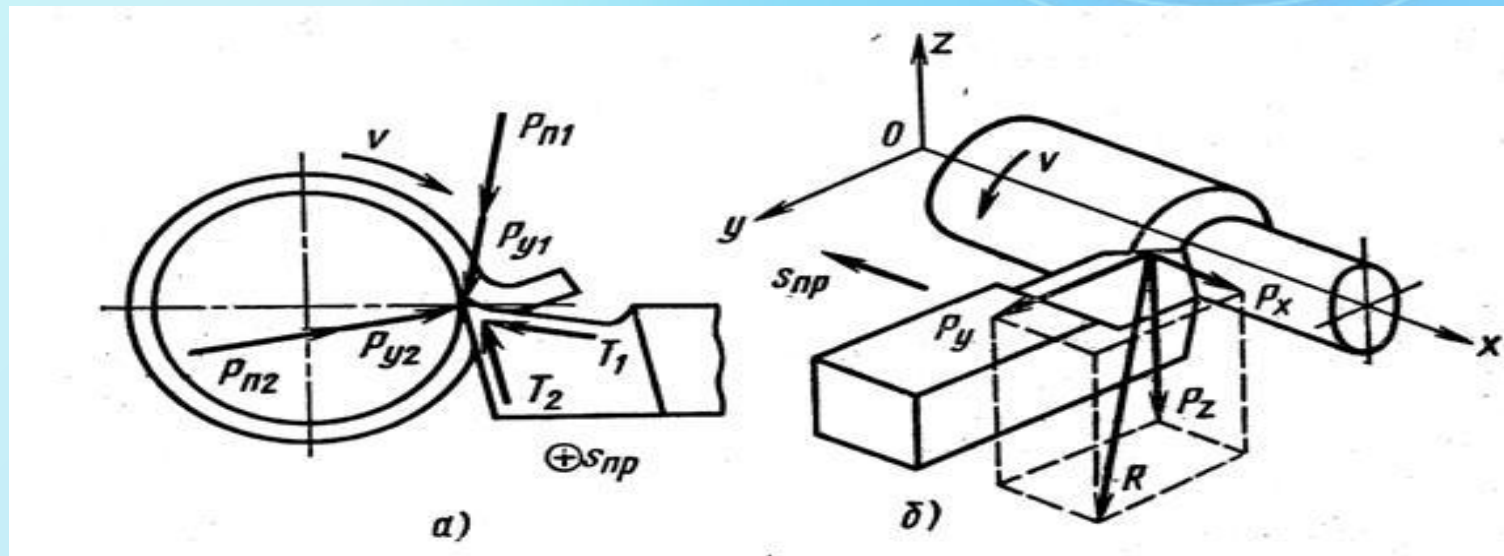
Система сил, действующих в процессе резания

- 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:

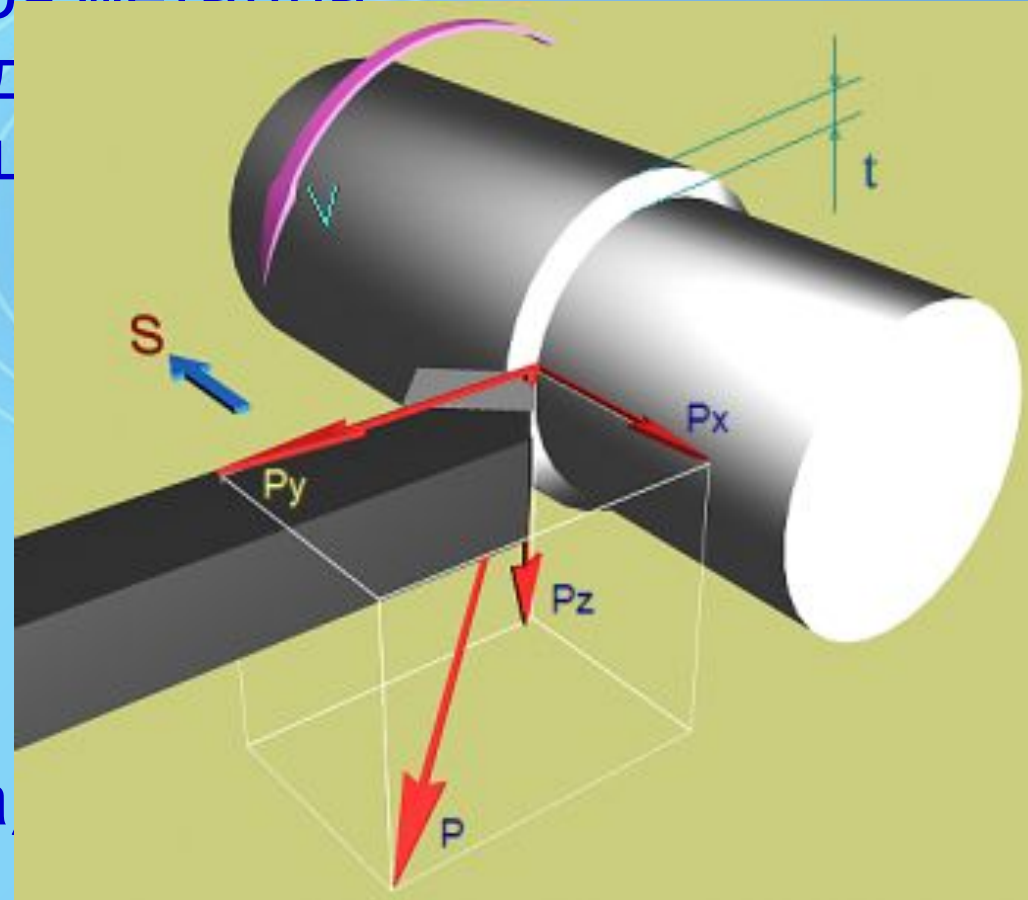
$$\bar{R} = \bar{P}_{y1} + \bar{P}_{y2} + \bar{P}_{n1} + \bar{P}_{n2} + \bar{T}_1 + \bar{T}_2$$



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 η - к.п.д. станка, равный 0,7 – 0,8.

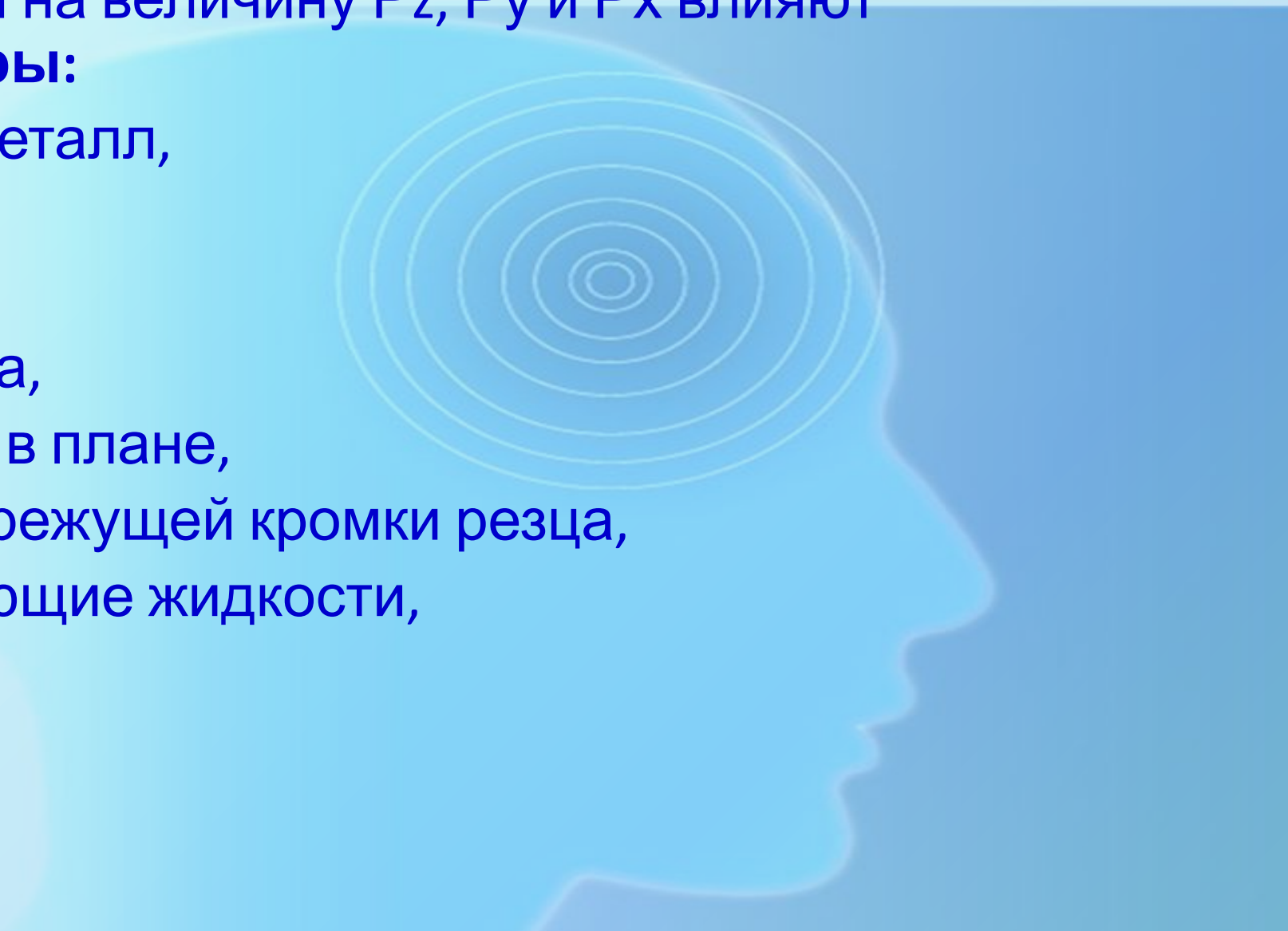
- Для осуществления процесса резания необходимо чтобы

$$N_{\text{э}} \leq N_{\text{ст.}}$$

- 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.

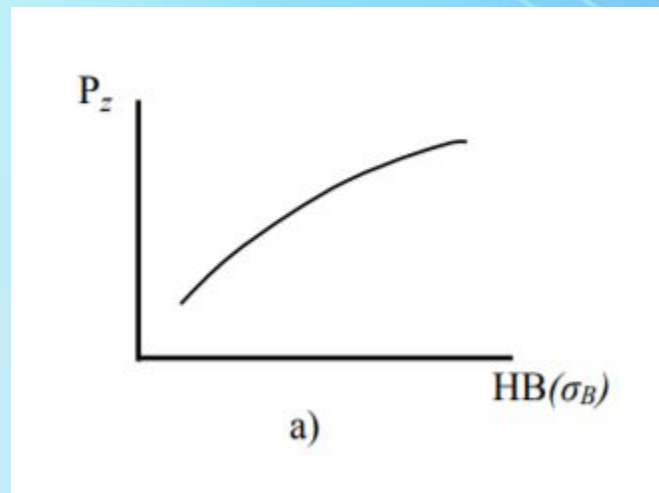
Факторы, влияющие на величину P_z , P_y и

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.
- 

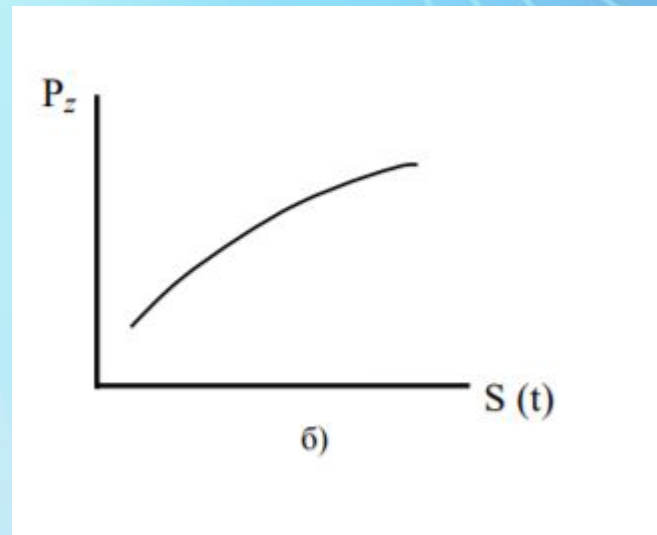
Физико-механические свойства

- 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 γ или чем больше угол резания, тем больше сила резания.
- При увеличении главного угла в плане ϕ 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

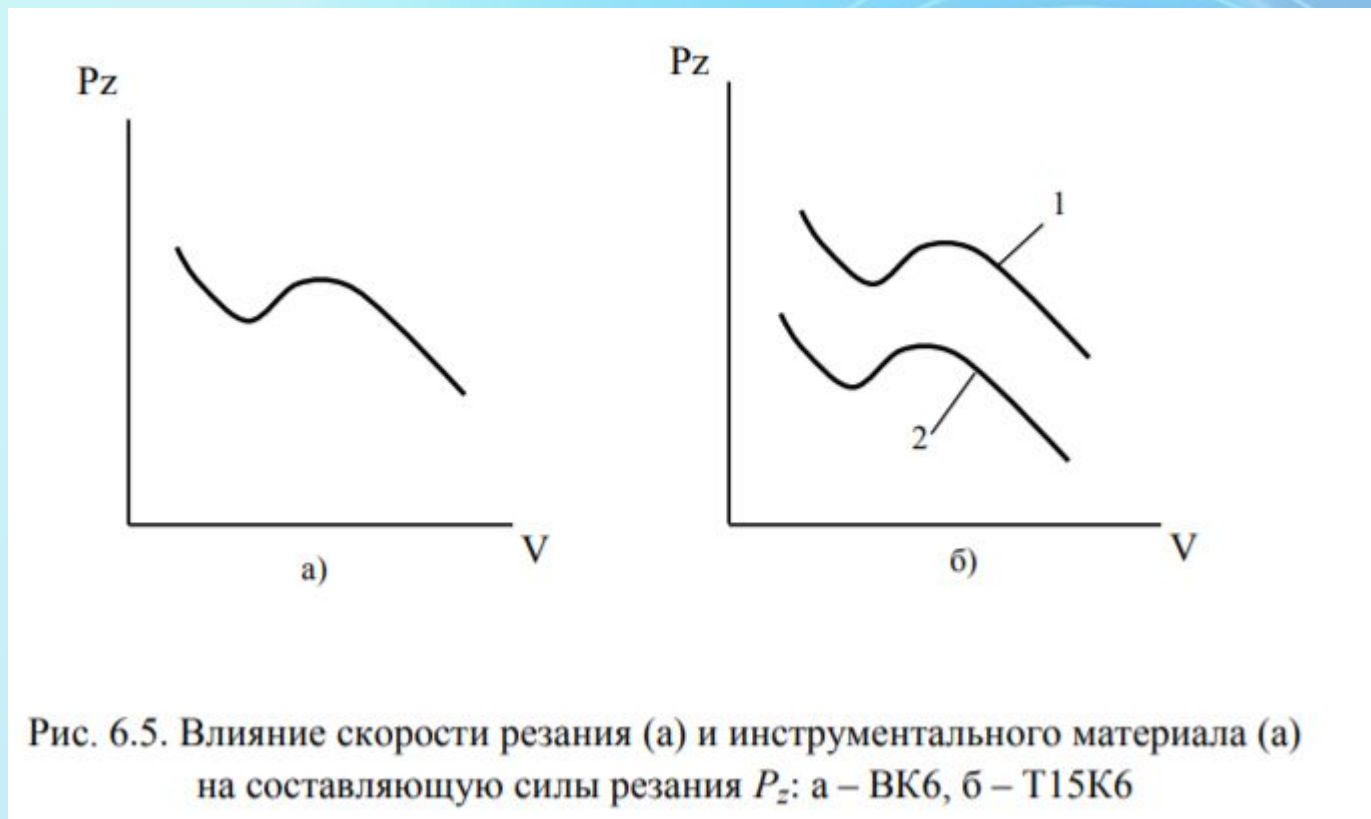


Рис. 6.5. Влияние скорости резания (а) и инструментального материала (а) на составляющую силы резания P_z : а – BK6, б – T15K6

Влияние износа, режущей части резца

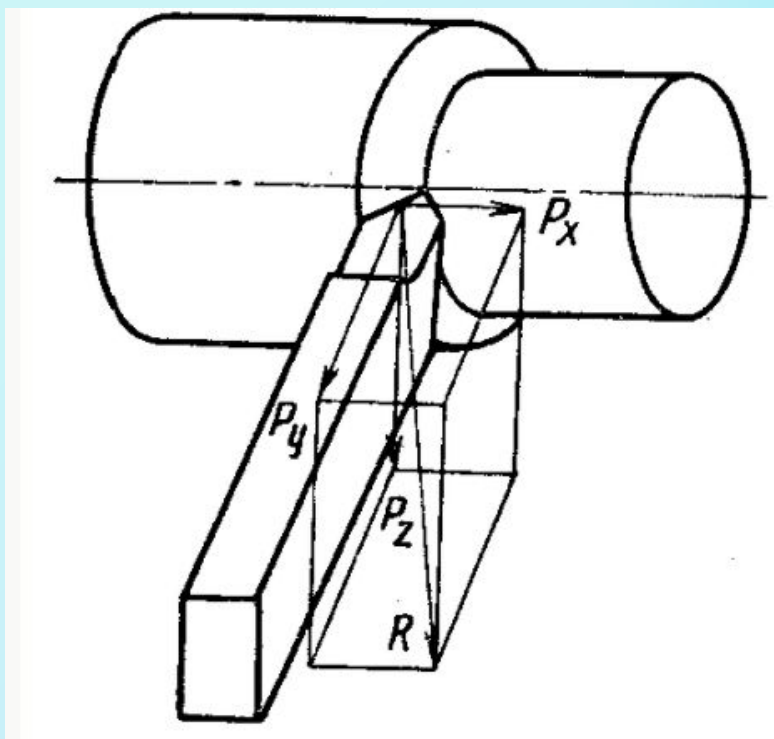
- Возрастание износа по задней поверхности незначительно увеличивает P_y и P_x .
- Сила резания зависит от материала режущей части резца. При обработке твердосплавными резцами силы резания несколько меньше, чем резцами из быстрорежущей стали.

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:



P_z – тангенциальная сила;

P_y – радиальная сила, действующая на механизм поперечной подачи;

P_x – осевая сила, или сила продольной подачи;

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

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

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

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

- где C_{Pz} , C_{Py} , C_{Px} , - 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_{Pz} , K_{Py} , K_{Px} – 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 σ_B , МПа ≤ 600 > 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 φ , 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 γ , 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 λ , 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 $K_{Pz} = K_{MPz} K_{\phi Pz} K_{\lambda Pz}$:
- $P_z = 10 C_{Pz} \cdot t^{X_{pz}} \cdot S_0^{Y_{pz}} \cdot V^{n_P} \cdot K_{MPz} \cdot K_{\phi Pz} \cdot K_{\lambda Pz} = 10 \cdot 300 \cdot 4 \cdot 0,6^{0,75} \cdot 110^{0,15} \cdot 0,9 \cdot 0,94 \cdot 1 = 3417 \text{ Н}.$
- **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.