

# ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДНЕГО УГЛА НА ФИЗИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

Козлов В.Н.<sup>1</sup>, Дин Ц.<sup>2</sup>, Чжан Х.<sup>3</sup>, Ли В.<sup>4</sup>, Ди Ч.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, доцент ОМШ,

E-mail: kozlov-viktor@bk.ru;

<sup>2</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, зр. 4АМ21,

E-mail: czechul@tpu.ru;

<sup>3</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, зр. 4АМ21,

E-mail: 1764602262@qq.com;

<sup>4</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, зр. 4АМ31,

E-mail: 1595534951@qq.com;

<sup>5</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, зр. 4АМ31,

E-mail: dc01@tpu.ru;

Для расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) режущего инструмента необходимо знать не только составляющие силы резания, но и распределение контактных нагрузок (напряжений) на его передней и задней поверхностях. При работе неизношенным инструментом принято считать, что силы действуют только на передней поверхности, а на главной и вспомогательной задних поверхностях они незначительны.

Для расчёта технологических составляющих силы резания можно использовать известную формулу [1, 2]

$$P_{z,y,x} = 10 \times C_P \times t^{xp} \times s^{yp} \times v^{np} \times K_P, [H] \quad (1)$$

где  $C_P$  – коэффициент, зависящий от обрабатываемого и режущего материала;  $K_P$  – произведение ряда коэффициентов, учитывающих влияние прочности обрабатываемого материала на силу резания, главного угла в плане  $\phi$ , главного переднего угла в главной секущей плоскости  $\gamma$  на силу резания, угла наклона главной режущей кромки  $\lambda$  на силу резания, влияние радиуса при вершине резца  $r$  на силу резания.

Для уточнения данных таблиц в справочнике [1] нами были измерены технологические составляющие  $P_y$ ,  $P_x$  и  $P_z$  силы резания (рис. 1) с использованием токарного трёхкомпонентного динамометра Kistler модели 9257В. Так как целью экспериментов было измерение сил при разных передних углах, то применялся токарный резец с напайной твёрдосплавной пластиной Т15К6 без покрытия с плоской передней поверхностью без стружкозавивающей канавки или порошка.

Главный угол в плане  $\phi = 45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\phi_1 = 45^\circ$ , радиус при вершине использовался очень небольшой  $r = 0,1$  мм для учёта сил только на главной режущей кромке (рис. 2). Использовались резцы с передними углами  $\gamma = 7^\circ$  и  $15^\circ$ , главным задним углом  $\alpha = 10^\circ$ , углом наклона главной режущей кромки  $\lambda = 0^\circ$ .

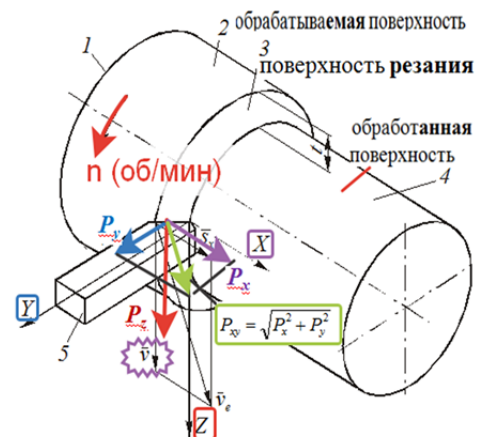


Рис. 1. Направление технологических составляющих  $P_y$ ,  $P_x$  и  $P_z$  силы резания

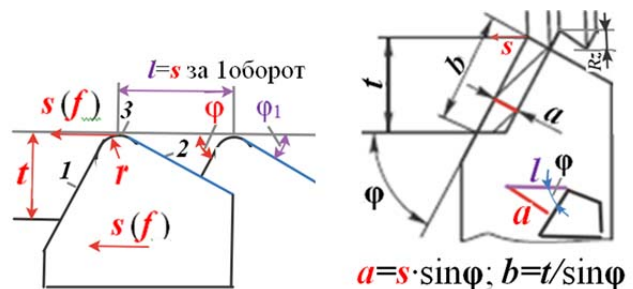


Рис. 2. Элементы режима резания и геометрия резца в плане (вид сверху).

1 – главная режущая кромка, 2 – вспомогательная режущая кромка, 3 – вершина резца, a – толщина среза, b – ширина среза

В качестве обрабатываемого материала применялась сталь 45, которая служит как эталонный материал при определении обрабатываемости и расчёта сил резания. В ходе экспериментов были измерены технологические составляющие  $P_y$ ,  $P_x$  и  $P_z$  силы резания, рассчитана результирующая сила  $P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ , действующая в основной плоскости и в главной секущей плоскости. То есть принималось, что результирующая  $P_{xy}$  направлена перпендикулярно к проекции главной режущей кромки на основную плоскость, что достаточно верно, при незначительности сил со стороны вспомогательной режущей кромки и вершины реза.

После этого рассчитывалась нормальная  $N$  и касательная  $F$  силы на передней поверхности, которые необходимы для построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности (рис. 3), т. е. для определения внешней нагрузки при расчёте НДС режущего инструмента [3]. Для их расчёта использовалась схема действия сил  $P_z$  и  $P_{xy}$  в главной секущей плоскости (рис. 4).

Расчёт физических составляющих силы резания  $N$  и  $F$  по технологическим составляющим  $P_z$  и  $P_y$  при переднем угле  $\gamma \neq 0^\circ$  выполняется по уравнениям, которые получаем из суммы векторов (рис. 4):

$$\vec{P}_{zn} = \vec{N}_{Pzn} + \vec{F}_{Pzn}; \quad \vec{P}_{xyn} = \vec{F}_{Pxy n} + \vec{N}_{Pxy n}. \quad (2)$$

Из этих формул при  $\gamma > 0^\circ$  получаем два уравнения (3) и (4) для расчёта физических сил резания:

$$N_{zn} = N_{Pzn} - N_{Pyn} = P_{zn} \times \cos \gamma - P_{xyn} \times \sin \gamma; \quad (3)$$

$$F_{zn} = F_{Pxy n} + F_{Pzn} = P_{xyn} \times \cos \gamma + P_{zn} \times \sin \gamma. \quad (4)$$

Точение выполнялось с продольной подачей  $s$  (мм/об) разной величины от 0,07 до 0,52 мм/об при постоянной глубине резания  $t = 2$  мм и скорости резания  $v = 146$  м/мин для предотвращения появления нароста. После расчёта физических составляющих, действующих на передней поверхности, рассчитывался средний условный коэффициент трения  $\mu_{cp} = F / N$  (см. графы 7 и 13 табл. 1).

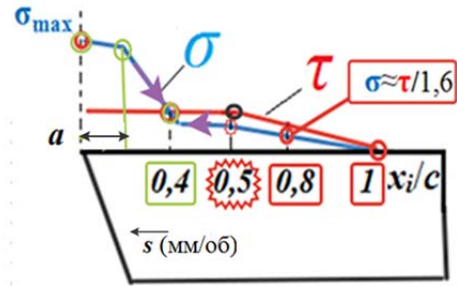


Рис. 3. Построение эпюр нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  контактных напряжений на передней поверхности

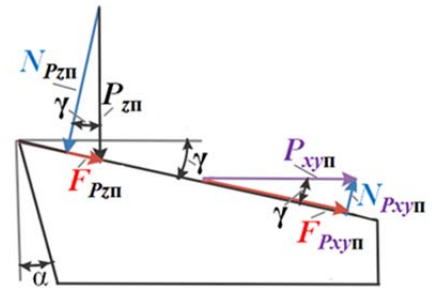


Рис. 4. Схема действия сил на передней поверхности

Таблица 1

Влияние переднего угла  $\gamma$  ( $^\circ$ ) и подачи  $s$  (мм/об) на составляющие силы резания при постоянной условной глубине резания  $t=2$  мм. Сталь 45 – T15K6,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм

Подача $s$ , мм/об	Толщина среза $a$ , мм	Технологические силы резания при $\gamma = +7^\circ$ , Н		Физические составляющие силы резания при $\gamma = +7^\circ$			Технологические силы резания при $\gamma = +15^\circ$ , Н			Физические составляющие силы резания при $\gamma = +15^\circ$		
		$P_{xy}$	$P_z$	$F^\circ$ , Н	$N^\circ$ , Н	$\mu_{cp}$	$P_{xy}$	$P_z$	$\mu_{cp}$	$F$ , Н	$N^\circ$ , Н	$\mu_{cp}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,07	0,05	286	443	338	405	0,83	223	433	0,516	327	360	0,909
0,11	0,08	396	619	469	566	0,83	309	577	0,536	448	477	0,939
0,23	0,16	742	1216	885	1117	0,79	635	1087	0,584	894	886	1,010
0,34	0,24	961	1735	1165	1606	0,73	864	1592	0,543	1247	1314	0,949
0,52	0,37	1144	2370	1425	2214	0,64	1078	2222	0,485	1616	1867	0,866

Из табл. 1 видно, что с увеличением переднего угла от 7 до 15 градусов нормальная сила  $N$  уменьшается, а величина среднего условного коэффициента трения  $\mu_{\text{ср}}$  увеличивается, несмотря на уменьшение силы трения  $F$  при толщине среза  $a = 0,05-0,08$  мм при одинаковых режимах резания. Это связано с отрицательным знаком второго составляющего в уравнении (3).

Увеличение силы трения при увеличении  $\gamma$  от 7 до 15 градусов при большей толщине среза  $a = 0,23-0,52$  мм и увеличение разницы с увеличением толщине среза связано, на наш взгляд, с наличием каких-то особых условий контакта на передней поверхности, т. к. при  $\gamma = +25^\circ$  и  $+35^\circ$  происходит уменьшение силы трения  $F$  при всех толщинах среза при сравнении с силами при  $\gamma = +15^\circ$ .

Уменьшение среднего условного коэффициента трения  $\mu_{\text{ср}}$  при увеличении толщины среза при одинаковом переднем угле объясняется нами увеличением температуры при-контактного слоя стружки, что приводит к уменьшению предела прочности на сдвиг обрабатываемого материала (стружки) в зоне вторичных пластических деформаций.

Наши эксперименты показали, что с увеличением подачи удельные силы резания  $q_{Pz} = P_z / (s \cdot t)$  и  $q_{Pxy} = P_{xy} / (s \cdot t)$  существенно уменьшаются и при обработке стали 45 и при обработке стали 40X (рис. 5), что связано с уменьшением доли сил на задней поверхности резца и на вспомогательной режущей кромке.

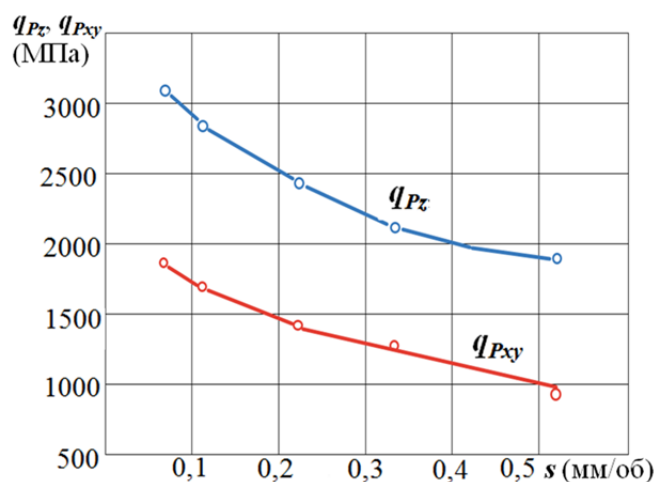


Рис. 5. Влияние подачи  $s$  (мм/об) на удельные силы резания  $q_{Pz}$  и  $q_{Pxy}$  (МПа) при обработке стали 40X.  $t = 2$  мм;  $v = 120$  м/мин, округление режущей кромки  $\rho \approx 5$  мкм.

Это происходит также и потому, что при увеличении подачи увеличивается температура в зоне первичных пластических деформаций, что приводит к уменьшению прочности материала, подвергаемому деформации в этой зоне при образовании стружки.

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

### Список литературы

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах, т. 2. Под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. – М.: Машиностроение, 2012. 496 с., ил.
2. Зубарев, Ю.М. Основы резания материалов и режущий инструмент: учебник / Ю.М. Зубарев, Р.Н. Битюков. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 228 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/126717> (дата обращения: 14.04.2019). – Режим доступа: из корпоративной сети ТПУ. – Текст: электронный.
3. Чэнь Юэчжоу. Расчёт эпюр контактных напряжений при обработке стали / Чэнь Юэчжоу, Чжан Цзяюй, В.Н. Козлов; науч. рук. В.Н. Козлов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22–24 апреля 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – С. 243–250.