

Чэнь Юэчжоу, Чжан Цзяюй, Козлов Виктор Николаевич  
Томский политехнический университет, г. Томск  
Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич, к.т.н., доцент

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДНЕГО УГЛА НА НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

На прочность режущего инструмента большое влияние оказывает передний угол  $\gamma$ , который измеряется в главной секущей плоскости режущего клина N-N (рис. 1). Проще всего рассматривать этот угол при токарной обработке (рис. 1), но и для других видов обработки его определение будет аналогичным. С увеличением переднего угла уменьшаются силы резания, но уменьшается и площадь поперечного сечения режущего клина, что может привести к поломке инструмента [1, 2].



Рис. 1. Поверхности и плоскости при точении.

1 – обрабатываемая поверхность, 2 – поверхность резания, 3 – обработанная поверхность, 4 – плоскость резания (касательная к поверхности резания и проходящая через главную режущую кромку б); 5 – основная плоскость (плоскость, параллельная продольному  $S_{пр}$  и поперечному  $S_{поп}$  перемещениям инструмента).

На передней поверхности режущего инструмента действуют физические составляющие силы резания  $P$ : нормальная сила к передней поверхности  $N_p$  и касательная сила к передней поверхности  $F_p$ , которые измеряются в главной секущей плоскости режущего клина.



Рис. 2. Технологические  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  и  $P_{xy}$  составляющие силы резания

Если главный передний угол  $\gamma$  не равен нулю, то напрямую физические составляющие силы резания  $N_p$  и  $F_p$  измерить невозможно. Поэтому при использовании динамометра измеряются технологические составляющие силы резания: тангенциальная составляющая  $P_z$ , направленная вертикально вниз (рис. 2); радиальная составляющая  $P_y$ , направленная от оси вращения заготовки в сторону оператора в основной плоскости (т.е. горизонтально) (рис. 2); осевая составляющая  $P_x$ , направленная вдоль оси вращения заготовки от шпинделя в основной плоскости.

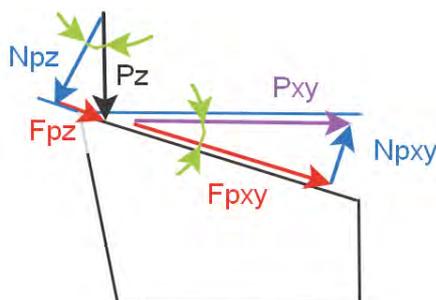


Рис. 3. Составляющие силы резания на передней поверхности в главной секущей плоскости

Расчёт физических составляющих силы резания  $N$  и  $F$  по технологическим составляющим  $P_z$  и  $P_{xy}$  при переднем угле  $\gamma \neq 0^\circ$  выполняем по формулам, которые получаем из векторных сумм (рис. 3):

$$P_z = NP_z + FP_z; \quad (1)$$

$$P_{xy} = FP_{xy} + NP_{xy}. \quad (2)$$

Из этих формул (1) и (2) получаем два уравнения для расчёта физических составляющих силы резания:

$$N = NP_z - NP_{xy} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma; \quad (3)$$

$$F = FP_{xy} + FP_z = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma. \quad (4)$$

Нормальная физическая силы  $NP_{xy}$  направлена в обратном направлении по сравнению с  $NP_z$  (рис. 3), поэтому в уравнении (3)  $P_{xy}$  стоит со знаком минус. Это создаёт парадоксальную ситуацию: при увеличе-

нии переднего угла с увеличением технологической силы  $R_{xy}$  нормальная физическая сила  $N$  в уравнении (3) уменьшается, что при очень больших передних углах (более  $25^\circ$ ) может приводит к нулевой нормальной силе, когда вторая часть формулы (3) становится равной первой части, т.е. коэффициент трения увеличивается с увеличением переднего угла  $\gamma$ .

По физическим силам  $N$  и  $F$  строим эпюры контактных напряжений [3].

Для расчёта методом конечных элементов по программе ANSYS необходимо задавать нагрузку на каждом ограниченном участке поверхности контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Для этого передняя поверхность модели режущего инструмента разбивается на небольшие участки длиной  $L_{pi} = 0,05-0,1$  (мм) и шириной  $b$  (мм), равной ширине контакта стружки с передней поверхностью. На каждом  $i$ -том участке по эпюрам контактных напряжений определяются физические силы  $N_i$  и  $F_i$ , которые прикладываются к соответствующему  $i$ -тому участку:

$$N_i = \sigma_{ср} \times L_{pi} \times b \text{ (Н)}; \quad (5)$$

$$F_i = \tau_{ср} \times L_{pi} \times b \text{ (Н)}, \quad (6)$$

где:  $\sigma_{ср}$  - среднее контактное нормальное напряжение (МПа) на участке длиной  $L_{pi}$  (мм);  $\tau_{ср}$  - среднее контактное касательное напряжение (МПа) на участке  $L_{pi}$  (мм).

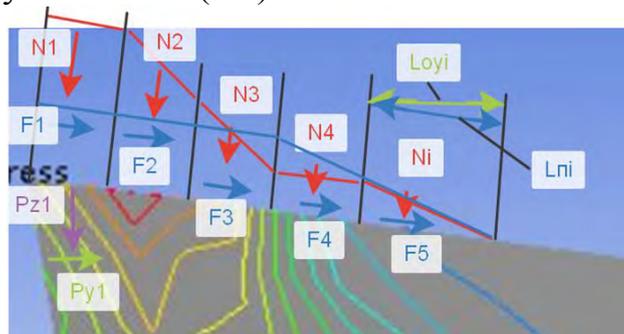


Рис. 4. Силы  $N_i$  и  $F_i$  определённые по эпюрам контактных напряжений  $\sigma$  и  $\tau$ , на различных участках контакта стружки с передней поверхностью резца

В программе ANSYS задаются силы, направленные вдоль осей  $OZ$ ,  $OY$  и  $OX$ . Поэтому рассчитанные физические составляющие на каждом участке преобразуем в технологические по соответствующим формулам. При рассмотрении сил в главной секущей плоскости необходимо добавить ось  $OXY$ , проходящую в основной плоскости вдоль действия

составляющей  $P_{xy}$ , которую будем обозначать для упрощения записи как  $OY^*$ , т.е.  $P^*y = P_{xy}$ .

От физической силы  $N_i$  будут действовать две технологические составляющие:  $P_z N_i$  и  $P_y N_i$ ; от физической силы  $F_i$  будут действовать тоже две технологические составляющие:  $P_y F_i$  и  $P_z F_i$ . Рассчитываем их с учётом расчётов по уравнениям (5) -(6) для каждого  $i$ -того участка:

$$P_z N_i = N_i \times \cos \gamma; \quad (7)$$

$$P_y N_i = N_i \times \sin \gamma; \quad (8)$$

$$P_y F_i = F_i \times \cos \gamma; \quad (9)$$

$$P_z F_i = F_i \times \sin \gamma. \quad (10)$$

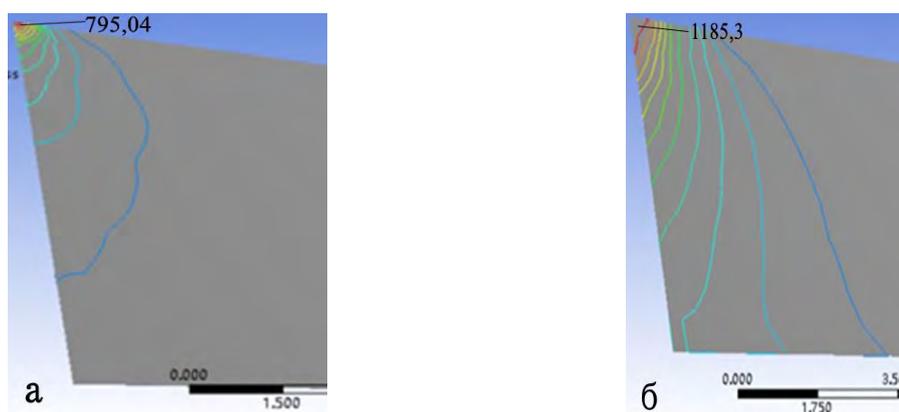


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{э}$  (МПа) в остром токарном резце. Сталь 40Х – Т15К6,  $t = 1,99$  мм,  $\gamma = 7^\circ$ .  
а –  $s = 0,07$  мм/об; б –  $s = 0,52$  мм/об

Результирующие  $P_{zi}$  и  $P_{yi}$  этих технологических составляющих прикладываются на передней поверхности резца к рассматриваемому участку  $i$  длиной  $L_{pi}$  с учётом расчётов по уравнениям (7) -(10):

$$P_{zi} = P_z N_i + P_z F_i; \quad (11)$$

$$P_{yi} = P_y F_i - P_y N_i. \quad (12)$$

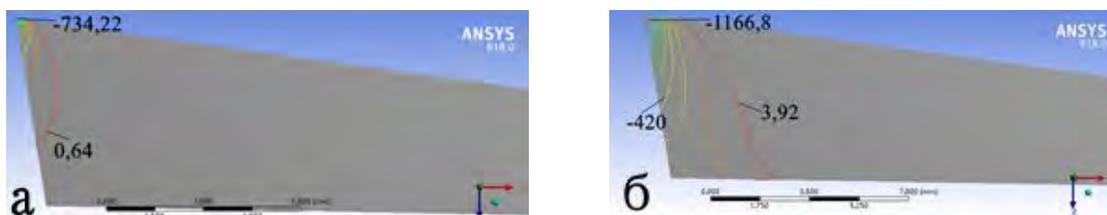


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений  $\sigma_{z тах}$  (МПа) в остром токарном резце. Сталь 40Х – Т15К6,  $t = 1,99$  мм,  $\gamma = 7^\circ$ .  
а)  $s = 0,07$  мм/об; б)  $s = 0,52$  мм/об

Расчёт внутренних напряжений выполнялся с использованием программного обеспечения ANSYS 18. При переднем угле  $\gamma = +7^\circ$  и подаче

$s = 0,07$  мм/об наибольшие эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв max}} = 795$  МПа (рис. 5 а), наибольшие напряжения вдоль оси OZ равны  $\sigma_z \text{ max} = 734$  МПа (рис. 6 а).

При подаче  $s = 0,52$  мм/об наибольшие эквивалентные напряжения увеличиваются приблизительно в 1,5 раза, до  $\sigma_{\text{экв max}} = 1185$  МПа (рис. 5 б), наибольшие напряжения вдоль оси OZ увеличиваются приблизительно в 1,6 раза, до  $\sigma_z \text{ max} = 1166$  МПа (рис. 6 б).

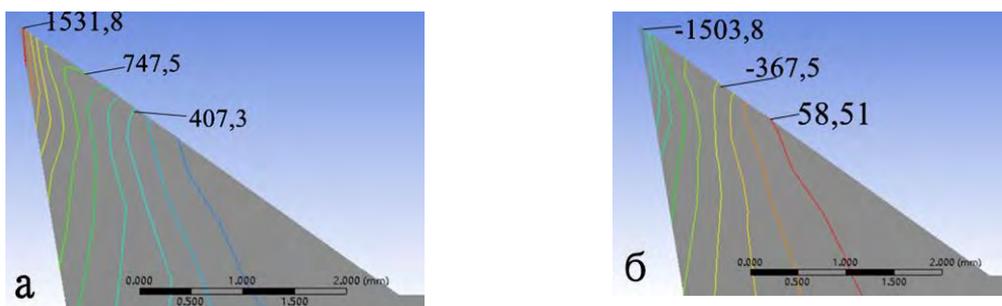


Рис. 7. Распределение эквивалентных  $\sigma_{\text{экв}}$  (а) и нормальных  $\sigma_z \text{ max}$  (б) напряжений (МПа) в остром токарном резце. Сталь 40Х – Т15К6,  $t = 1,99$  мм,  $\gamma = +35^\circ$ ,  $s = 0,52$  мм/об

При увеличении переднего угла до  $\gamma = +35^\circ$  и применении подачи  $s = 0,52$  мм/об (толщина среза  $a = 0,368$  мм, длина контакта стружки  $c = 1,5$  мм) наибольшие эквивалентные напряжения увеличиваются несущественно для такого большого переднего угла – приблизительно в 1,3 раза, до  $\sigma_{\text{экв max}} = 1531$  МПа (Рис. 7 а). То же самое происходит и с наибольшими напряжениями вдоль оси OZ:  $\sigma_z \text{ max} = 1503$  МПа (рис. 7 б).

Этот с виду парадоксальный результат расчётов объясняется нами существенным уменьшением нормальной силы на передней поверхности при увеличении переднего угла, см. уравнение (3), которая наиболее существенно влияет на прочность режущего клина из-за её направления.

Анализ результатов расчётов НДС резца показывают, что при создании твёрдосплавного материала достаточно высокой прочности можно обрабатывать сталь даже при очень большом переднем угле (около  $+35^\circ$ ). Предел прочности на изгиб такого материала должен быть больше 1900 МПа.

Твёрдые сплавы с размером зёрен более 1 мкм имеют прочность на изгиб  $\sigma_i = 900 \dots 1600$  МПа и в 2...3 раза уступают быстрорежущим сталям. Особо мелкозернистые твердые сплавы (размер зерна менее 0,1-0,05 мкм) имеют прочность на изгиб  $\sigma_i = 2000 \dots 3500$  МПа, поэтому рекомендуется их использовать при изготовлении режущих инструментов с большим передним углом.

### Заключение

1. Чем больше передний угол, тем больше внутренние напряжения в режущем клине, но увеличение переднего угла до  $+35^\circ$  не приводит к катастрофическому увеличению напряжений при точении стали 40Х, при этом лучше удаляется стружка и улучшается качество обработанной поверхности.

2. При обработке стали 40Х острым токарным резцом из Т15К6 с подачей  $s = 0,52$  мм/об предельно допустимый передний угол  $\gamma = +32^\circ$ , больше которого будет происходить поломка резца.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
2. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
3. Козлов В.Н., Цуй Ц., Чжан Ц., Хуан Ч. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях режущего инструмента/ В.Н. Козлов, Ц. Цуй, Ц. Чжан, Ч. Хуан // Наука и образование: материалы VI Всероссийского фестиваля науки. XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных/ отв. ред. А. Ш. Бодрова, Е. В. Колесникова. –Томск: Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2016, с. 97-105.

Чэнь Юэчжоу, Чжан Цзяюй, Козлов Виктор Николаевич

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич, к.т.н., доцент

### **РАСЧЁТ ЭПЮР КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ**

Для расчёта на прочность режущих инструментов необходимо знать распределение контактных напряжений на поверхностях режущего клина. Экспериментальное изучение распределения очень трудоёмко и требует специальных дорогостоящих приборов.

Поляризационно-оптический метод позволяет определить характер распределения напряжений, изменение коэффициента трения вдоль передней поверхности резца (Рис. 1), но возможна обработка только мягких материалов (например, свинца, кадмия и т.п.) при небольших ско-