

Дин Цзэжу (Китай), Чжан Хао (Китай),
Козлов Виктор Николаевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич,
канд. техн. наук, доцент

ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА НА КОНТАКТНЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ

При фрезеровании заготовок концевыми фрезами большое значение имеет износ по задней поверхности главных режущих кромок (рис. 1). Возникающая при этом радиальная составляющая P_r силы резания (рис. 2) приводит к отжиму фрезы от обрабатываемой поверхности.

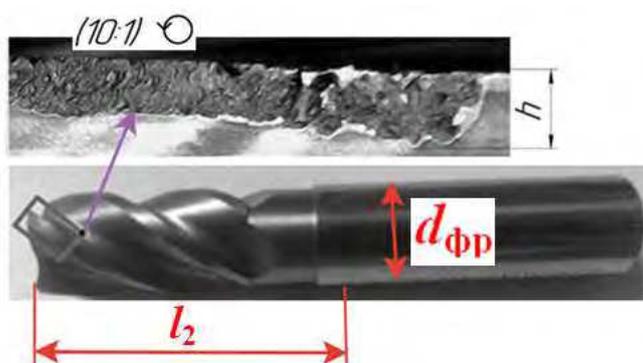


Рис. 1. Длина фаски износа h по задней поверхности главной режущей кромки концевой фрезы

Малая жёсткость концевых фрез в радиальном направлении из-за небольшого диаметра пальцевых концевых фрез ($d_{фр} = \text{Ø}6-16$ мм) и большой длины вылета l_2 рабочей части фрезы относительно цанги ($l_2 = 3 \cdot d_{фр}$) приводит к отжиму фрезы от заготовки и возникновению вибрации.

Это вызывает ухудшение качества обработки и увеличивает вероятность выкрашивания режущей кромки (рис. 1). С экономической точки зрения увеличивать диаметр пальцевой концевой фрезы более 16 мм не рационально, особенно при использовании твёрдосплавных фрез. Поэтому нами были проведены стойкостные эксперименты при фрезеровании стальной заготовки концевыми фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 и из твёрдого сплава ВК8, во время которых с помощью динамометра Kistler периодически измерялись составляющие P_h , P_v и P_x силы резания (рис. 3). Только эти составляющие могут быть измерены динамометром при фрезеровании.

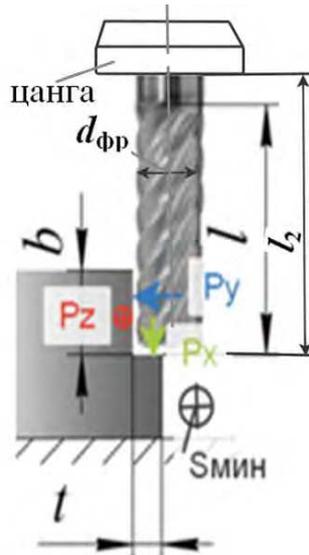


Рис. 2. Направление составляющих силы резания

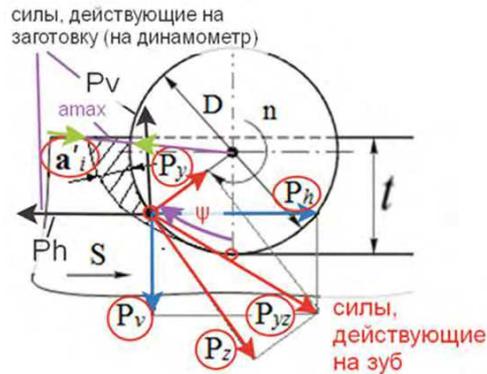


Рис. 3. Изменение направления действия составляющих P_z и P_y силы резания при повороте зуба фрезы на угол ψ

При вращении фрезы только осевая составляющая P_x не меняет своего направления. Действующие на зуб фрезы составляющие P_z и P_y , которые необходимо знать для расчёта фрезы на прочность, невозможно измерить из-за поворота зуба фрезы на угол ψ при вращении фрезы (рис. 3).

Анализ изменения направления составляющих P_z и P_y силы резания показал, что при малой глубине фрезерования t или при малом соотношении $t/d_{фр}$ ($t/d_{фр} < 0,1$) изменение направления этих составляющих незначительно. При этом измеряемая динамометром сила P_h будет примерно равна силе P_z , а сила P_v будет примерно равна силе P_y (рис. 4).

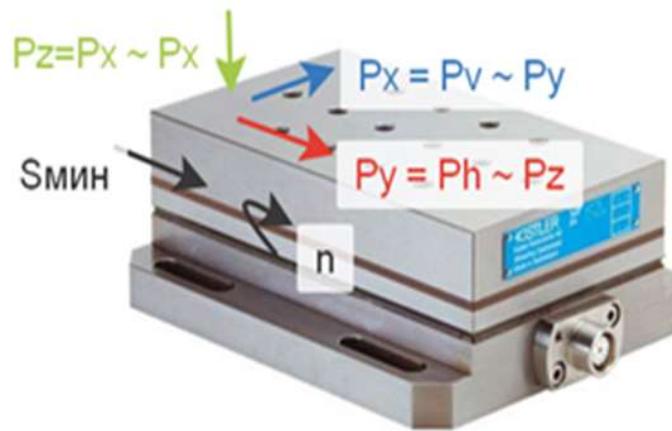


Рис. 4. Направления измеряемых сил, отображаемых на мониторе динамометра Kistler, соответствие их при фрезеровании и приблизительное соответствие тангенциальной P_z и радиальной P_y силам при $t/d_{фр} < 0,1$

При попутном фрезеровании заготовки вдоль длинной стороны динамометра (рис. 4) периодически измерялись составляющие силы резания, результаты изменения которых в зависимости от времени фрезерования τ (мин) представлены на рис. 5. По оси абсцисс дополнительно показано также изменение длины фаски износа h_3 (мм) по задней поверхности, примыкающей к главной режущей кромке, в зависимости от времени фрезерования τ (мин).

Таким образом, на рис. 5 показано влияние длины фаски износа по задней поверхности h_3 на величину составляющих силы резания. Если принять, что увеличение длины фаски износа по задней поверхности мало влияет на величину сил на передней поверхности, то разница между текущей силы P_i и начальной величины силы $P_{нач}$ есть сила на фаске износа по задней поверхности.

$$\text{Например, } P_{zi} - P_{zнач} = P_{zhi} = F_{hi} \text{ (Н); } P_{yi} - P_{yнач} = P_{yhi} = N_{hi} \text{ (Н); } \\ P_{xi} - P_{xнач} = P_{xhi} = N_{уголк hi} \text{ (Н);}$$

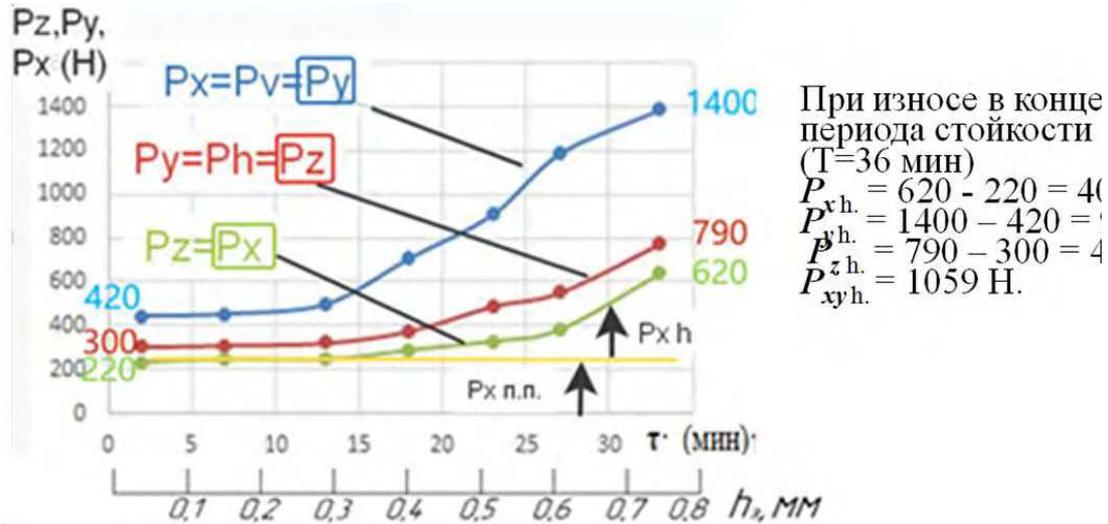


Рис. 4. Изменение составляющих P_h , P_v и P_x силы резания при попутном фрезеровании стальной заготовки в зависимости от времени фрезерования τ (мин) и длины фаски износа h (мм) по задней поверхности при $t/d_{фр} < 0,1$. Сталь 40Х-Р6М5, подача на зуб $s_z=0,09$ мм/зуб, глубина фрезерования $t=1$ мм, ширина фрезерования $b=8$ мм, скорость резания $v=130$ м/мин.

В направлении оси OX действует сила $P_x i$, которую можно разделить на осевую силу на главной режущей кромки P_x гл.р.к. i , имеющей угол наклона $\omega = 15-25^\circ$, на осевую силу на вспомогательной режущей кромке на зубе на торце фрезы P_x торц. i и на осевую силу от износа по уголкам P_x уголок i . При обычном правом направлении винтовой канавки зубьев сила P_x гл.р.к. i стремится поднять заготовку, а сила P_x торц. i действует наоборот вниз. У неизношенной фрезы эти силы могут компенсировать друг друга.

При износе фрезы по уголкам сила P_x уголок i . направлена всегда вниз и играет решающую роль в силовом взаимодействии фрезы и заготовки, износ по уголкам приводит к существенному увеличению температуры резания. Это в свою очередь увеличивает интенсивность износа и особенно по уголкам. Режущая кромка на фаске износа по уголкам является дополнительно появляющейся вспомогательной режущей кромкой. Угол наклона фаски износа по уголкам в осевой плоскости обычно равен $\phi_{1.2} = 10-15^\circ$ и может быть принят как нуль градусов для упрощения расчётов. Угол наклона задней поверхности фаски износа по уголкам в осевой плоскости обычно равен $\alpha_{1.2} = 0^\circ$, поэтому осевую силу на фаске износа по уголкам можно принять как нормальную силу, действующую на фаске износа в осевом направлении вверх, т.е. $P_x h i = N$ уголок $h i$.

Конечно, на фаске износа по уголкам будет действовать и касательная сила $F_{\text{уголок } h i}$, но выделить её из окружной (тангенциальной) силы $P_z i$ можно только сравнением величины этой силы при ширине фрезерования $b > 2$ мм и при ширине фрезерования $b < 0,5$ мм. Тангенциальная сила только на фаске износа по уголкам $F_{\text{уголок } h i}$ и на фаске износа по задней поверхности у главной режущей кромки $F_{h i}$ обычно небольшая в связи с малым коэффициентом трения по задней поверхности. Это было выявлено при исследовании распределения контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при точении стали, исследование которого существенно проще из-за неизменного направления составляющих силы резания P_z , P_y и P_x .

Подтверждением этого является график изменения силы $P_z i$ при увеличении фаски износа по задней поверхности у главной режущей кромки. При этом мы принимаем, что сила трения на фаске износа по уголкам пренебрежимо мала.

Можно рассчитать тангенциальную силу (силу трения) на фаске износа по уголкам как произведение нормальной силы на фаске износа по уголкам на условный средний коэффициент трения на фаске износа по задней поверхности $\mu_{h\text{cp}} = 0,58$ полученный при исследовании распределения контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при точении стали [1].

В этом случае при $\tau = 36$ мин (и $h_z = 0,75$ мм) на фаске износа по уголкам будет действовать касательная сила $F_{\text{уголок } h i} = N_{\text{уголок } h i} \times \mu_{h\text{cp}} = P_x h i \times \mu_{h\text{cp}} = 420 \times 0,58 = 243,6 \approx 244$ Н.

Тогда на фаске износа по задней поверхности у главной режущей кромки $F_{h i} = P_z h i - F_{\text{уголок } h i} = 490 - 244 = 246$ Н.

Условный средний коэффициент трения на фаске износа по задней поверхности у главной режущей кромки $\mu_{h\text{cp}} = F_{h i} / N_{h i} = 246/980 \approx 0,25$.

Удельная тангенциальная сила резания на передней поверхности зуба концевой быстрорежущей фрезы рассчитывается по уравнению:

$$q_{P_z \text{ п}} = P_z / (t \cdot b) = 300 / (1 \cdot 8) = 37,5 \text{ Н/мм}^2.$$

Удельная радиальная сила резания на передней поверхности зуба концевой быстрорежущей фрезы рассчитывается по уравнению:

$$q_{P_y \text{ п}} = P_y / (t \cdot b) = 420 / (1 \cdot 8) = 52,5 \text{ Н/мм}^2.$$

Удельная осевая сила резания на передней поверхности зуба концевой быстрорежущей фрезы рассчитывается по уравнению:

$$q_{P_x \text{ п}} = P_x / (t \cdot b) = 220 / (1 \cdot 8) = 27,5 \text{ Н/мм}^2.$$

Удельные касательные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,05 до 0,3 мм: $qFh = Fh / (h_z \cdot b) = P_z h / (h_z \cdot b) = 0 / (0,3 \cdot 8) = 0$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,05 до 0,15 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 0 / (0,1 \cdot 8) = 0$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,15 до 0,25 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 10 / (0,1 \cdot 8) = 12,5$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,25 до 0,3 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 15 / (0,05 \cdot 8) = 37,5$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,3 до 0,4 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 223 / (0,1 \cdot 8) = 278,75$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,4 до 0,5 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 224 / (0,1 \cdot 8) = 280$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,5 до 0,6 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 224 / (0,1 \cdot 8) = 280$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,6 до 0,7 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 220 / (0,1 \cdot 8) = 275$ МПа.

Удельные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,7 до 0,75 мм: $qNh = Nh / (h_z \cdot b) = P_y h / (h_z \cdot b) = 84 / (0,05 \cdot 8) = 209$ МПа.

Удельные касательные нормальные контактные нагрузки на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы при длине фаски износа h_z от 0,6 до 0,7 мм: $qFh = Fh / (h_z \cdot b) = P_z h / (h_z \cdot b) = 91,7 / (0,1 \cdot 8) = 114$ МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников Д. В., Гречишников В. Л., Кирсанов С. В., Кокарев В. И., Схиртладзе А. Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. - 2-е изд. доп. М.: Машиностроение, 2005. - 528 с: ил.
2. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.

