

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Сборник статей
XVI Международной научно-технической конференции

27 ноября – 1 декабря 2023 г.

Томск 2024

УДК 621.002(063)
ББК 34.4л0
С56

С56 **Современные проблемы машиностроения** : сборник статей XVI Международной научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – 567 с.

Сборник содержит статьи XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», проходившей 27 ноября – 1 декабря 2023 г. Конференция работала по секциям: конструирование, расчет и надежность машин; электромеханика и мехатроника; современные производственные технологии; материаловедение и нанотехнологии в машиностроении; автоматизация и моделирование технологических процессов; промышленная безопасность; дизайн и проектирование в машиностроении; наземно-транспортные машины и комплексы; школьная секция.

Предназначен для специалистов в области материаловедения, сварки, машиностроения, а также для студентов и аспирантов вузов соответствующих специальностей.

УДК 621.002(063)
ББК 34.4л0

Редакционная коллегия

А.И. Сечин, доктор технических наук, профессор ТПУ;
М.С. Кухта, доктор философских наук, профессор ТПУ;
А.А. Моховиков, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
Е.Н. Пашков, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
А.П. Соколов, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
В.Н. Козлов, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
Е.А. Ефременков, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
С.Н. Кладиев, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
С.В. Ляпушкин, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
К.А. Колесникова, кандидат технических наук, доцент ТПУ;
С.Н. Сорокова, кандидат физико-математических наук, доцент ТПУ;
В.А. Аметов, доктор технических наук, профессор ТГАСУ;
М.Ю. Попов, кандидат технических наук, доцент ТГАСУ;
П.В. Исаенко, кандидат технических наук, доцент ТГАСУ;
И.И. Медведев, директор АНО ДО ДТ «Кванториум»;
Т.Г. Костюченко, кандидат технических наук, доцент АНО ДО ДТ «Кванториум»;
М.А. Джасем, старший преподаватель ТПУ;
М.С. Черемискина, старший преподаватель ТПУ;
А.М. Богдан, ведущий эксперт организационного отдела ТПУ;
Т.В. Пегушина, инженер ТПУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЁТА СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ

Козлов В.Н.¹, Бабаев А.С.², Шевчук А.С.³

¹Томский политехнический университет, ИШНПТ, доцент ОМШ

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

²Томский государственный университет, старший научный сотрудник

E-mail: a.s.babaev@mail.tsu.ru;

³Томский государственный университет, аспирант

E-mail: shvpro@yandex.ru;

При фрезеровании пазов и уступов чаще всего используются монолитные фрезы из быстрорежущих сталей или из твёрдых сплавов (рис. 1). Для расчёта составляющих силы резания используется расчёт тангенциальной силы резания P_z [1], по отношению к которой рассчитываются другие составляющие: сила подачи P_h , действующая вдоль направления минутной подачи $s_{\text{мин}}$; боковая сила P_v , действующая перпендикулярно направлению подачи; осевая сила P_x , действующая вдоль оси фрезы (может быть направлена от заготовки и, наоборот, затягивать фрезу в заготовку из-за положительного угла наклона винтовой канавки ω (рис. 1) при отсутствии износа зубьев фрезы по уголкам; радиальная сила P_y , действующая на зуб фрезы по направлению к оси вращения фрезы.

$$P_z = \frac{10C_p t^x s_z^y B^u z}{D^q n^w} \times K_{Mp} \quad (1)$$

где t – глубина фрезерования (ширина уступа) (мм); s_z – подача на зуб (мм/зуб); B – ширина фрезерования (высота уступа) (мм); z – количество зубьев фрезы (шт); D – диаметр фрезы (мм); n – частота вращения фрезы (об/мин).

Минутная подача рассчитывается по формуле: $s_{\text{мин}} = s_z \times z \times n$ (мм/мин). Направление минутной подачи на рис. 1 показано для попутного фрезерования, т. е. в направлении вращения фрезы (от наблюдателя).

Силы P_h , P_v и P_x изменяют свою величину, но не изменяют своего направления при вращении фрезы, а силы P_z и P_y изменяют своё направление (рис. 2), поэтому их невозможно измерить с помощью динамометра. Их величина зависит от ширины фрезерования, подачи на зуб и от величины центрального угла ψ (угла контакта), который при встречном фрезеровании отсчитывается от точки врезания зуба в заготовку (рис. 2). При попутном фрезеровании этот угол ψ отсчитывается от точки выхода зуба из контакта с заготовкой до текущего положения зуба.

При фрезеровании уступа на стальной заготовке концевой фрезой из быстрорежущей стали диаметром D до 16 мм и глубине фрезерования t от 1 до

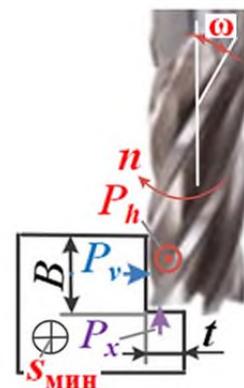


Рис. 1. Элементы режима резания и технологические силы P_h , P_v , P_x , действующие на фрезу при попутном концевом фрезеровании



Рис. 2. Направление технологических составляющих P_h , P_v и P_x , действующих на заготовку (на динамометр) при встречном фрезеровании, и сил P_z и P_y , действующих на зуб фрезы

3 мм рекомендуется использовать подачу на зуб $s_z = 0,08-0,05$ мм/зуб [1]. Ширина фрезерования B при этом не оговаривается, но обычно $B < D/3$.

При фрезеровании стальной заготовки концевой фрезой из **твёрдого сплава** диаметром D до 16 мм и глубине фрезерования t до 3 мм рекомендуется использовать подачу на зуб $s_z = 0,02-0,06$ мм/зуб как при черновом, так и при чистовом фрезеровании.

При работе с подачами для чистового фрезерования достигается параметр шероховатости $Ra = 0,8...1,6$ мкм как по горизонтальной, так и по вертикальной поверхности уступа. Шероховатость по горизонтальной поверхности уступа в меньшей степени зависит от подачи на зуб, т. к. она обрабатывается вспомогательной режущей кромкой зуба (на торце фрезы), поэтому при вращении фрезы многократно обрабатывается всеми зубьями фрезы.

При фрезеровании паза в стальной заготовке концевой фрезой из быстрорежущей стали диаметром D до 16 мм, т. е. при глубине фрезерования $t = D$ рекомендуется использовать подачу на зуб $s_z = 0,01$ мм/зуб при пределе прочности на растяжение конструкционной стали $\sigma_b < 750$ МПа, а при обработке сталей более высокой прочности подачи рекомендуется снижать на 20-40 % [1]. Ширина фрезерования B (глубина паза) при этом зависит от глубины паза вала t_1 по стандарту (ГОСТ 23360-78 или СТ СЭВ 189-75) (обычно $B = t_1 \approx D/2,7$) или не оговаривается, но обычно $B < D/2$.

В ходе проведения стойкостных испытаний фрез диаметром 16 мм из твёрдого сплава марки ВК8 при обработке уступа глубиной 8 мм (ширина фрезерования $B = 8$ мм) и шириной 1 мм (глубина фрезерования $t = 1$ мм) в заготовке из стали 45 при измерении составляющих силы резания динамометром Kistler были получены составляющие силы фрезерования (средняя величина при неизношенной фрезе): $P_{v \text{ эксп}} = 420$ Н, $P_h \text{ эксп} = 300$ Н, $P_x \text{ эксп} = 220$ Н. Так как $t/D < 0,06$, то можно принять, что тангенциальная сила $P_z \text{ эксп} \approx P_h \text{ эксп} = 300$ Н, а радиальная сила $P_y \text{ эксп} \approx P_v \text{ эксп} = 420$ Н.

Таблица 1

Физико-механические характеристики обрабатываемого материала

Марка стали	Предел прочности σ_b , МПа	Твёрдость НВ	Группа обрабатываемости по ISO 513
Сталь 45	590	229±8	Р

Фрезерование осуществлялось на фрезерном станке с ЧПУ мод. VF2 фирмы HAAS (США). Характеристики станка приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики станка VF2

Максимальная частота вращения шпинделя, об/мин	8100
Макс. мощность шпинделя, кВт	22,4
Точность позиционирования, мм	±0,0050
Повторяемость перемещений, мм	±0,0025
Макс. перемещение по оси X, мм	762
Макс. перемещение по оси Y, мм	406
Макс. перемещение по оси Z, мм	508

Режимы фрезерования, согласно техническому заданию, были одинаковы для всех инструментов и приведены в табл. 3. Фрезерование осуществлялось с подачей в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) марки IGAT PlatinCoolLowtemp на минеральной масляной основе.

Режимы фрезерования во время испытаний

t , мм	B , мм	v , м/мин	n , об/мин	s_z , мм/зуб ($s_{\text{мин}}$, или FDмм/мин)	Q (см ³ /мин)
1	8	130	2586	0,09 (931)	7,45

Примечание: t – глубина фрезерования; B – ширина фрезерования; v – скорость резания; n – частота вращения фрезы (об/мин); F_z ($s_{\text{мин}}$) – подача на зуб (минутная подача); Q – объём срезаемого материала.

Расчёт силы P_z для четырёхзубой концевой фрезы из твёрдого сплава без покрытия по данным справочника [1] (табл. 4):

$$P_{z \text{ расч.спр}} = \frac{10 \times C_p \times t^x \times s_z^y \times B^u \times z}{D^q \times n^w} K_{Mp} = \frac{10 \times 12,5 \times 1^{0,85} \times 0,09^{0,72} \times 8^1 \times 4}{16^{0,73} \times 2586^{-0,13}} \times 0,93 =$$

$$= 657 \times 2586^{0,13} / 7,568 = 657 \times 2,777 / 7,568 = 241,1 \text{ Н.}$$

где $K_{Mp} = \left(\frac{\sigma_s}{750} \right)^{n_v} = \left(\frac{590}{750} \right)^{0,3} = 0,93$.

Таблица 4

Коэффициент и показатели степени при расчёте силы резания P_z , указанные в справочнике [1]

Материал концевой фрезы	C_p	x	y	u	q	w
Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Твёрдый сплав	12,5	0,85	0,75	1,0	0,73	-0,13

Из эксперимента было получено, что $P_{z \text{ эксп}} \approx P_{h \text{ эксп}} = 300 \text{ Н}$. Таким образом, погрешность расчёта по уравнению ($P_{z \text{ расч. спр}}$) по данным из справочника (считаем, что измеренная сила $P_{z \text{ эксп}} \approx P_{h \text{ эксп}}$ более близка к истинной):

$$\Delta P_{z \text{ расч. спр}} \approx [(P_{z \text{ эксп}} - P_{z \text{ расч. спр}}) / P_{z \text{ эксп}}] \times 100 \% = [(300 - 241) / 300] \times 100 \% \approx 19,7 \%$$

Используя рассчитанную тангенциальную силу резания $P_{z \text{ расч. спр}}$ были рассчитаны и другие составляющие силы резания по указанным в справочнике соотношениям (таблица 5), учитывая работу по схеме несимметричного попутного фрезерования (см. рис. 1). Т. к. в справочнике указан диапазон изменения соотношения, то расчет выполнялся для крайних величин диапазона.

Таблица 5

Относительные значения составляющих силы резания при фрезеровании по данным справочника [1]

Фрезерование	P_h/P_z	P_v/P_z	P_y/P_z	P_x/P_z
<i>Фрезы торцовые и концевые, работающие по схеме торцового фрезерования * (см. рис. 2)</i>				
Несимметричное встречное	0,6 – 0,8	0,6 – 0,7	0,3 – 0,4	0,5 – 0,55
Несимметричное попутное	0,2 – 0,3	0,9 – 1,0	0,3 – 0,4	0,5 – 0,55

Сила подачи: $P_{h \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,2 = 241 \times 0,2 = 48,2 \text{ Н}$; $P_{h \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,3 = 72,3 \text{ Н}$;

Боковая сила: $P_{v \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,2 = 241 \times 0,9 = 216,9 \text{ Н}$; $P_{v \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 1,0 = 241 \text{ Н}$;

Радиальная сила: $P_{y \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,3 = 241 \times 0,3 = 72,3 \text{ Н}$;

$P_{y \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,4 = 96,4 \text{ Н}$;

Осевая сила: $P_{x \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,5 = 241 \times 0,5 = 120,5 \text{ Н}$;

$P_{x \text{ спр}} = P_{z \text{ расч. спр}} \times 0,55 = 132,55 \text{ Н}$.

Сравнивая рассчитанные силы по данным справочника, видим, что сила подачи $P_{h \text{ эксп}} = 300$ Н намного больше рассчитанной, даже при наибольшем коэффициенте соотношения 0,3: $P_{h \text{ спр}} = 72,3$ Н. В этом случае погрешность расчёта составит $\Delta P_{h \text{ спр}} \approx [(P_{h \text{ эксп}} - P_{h \text{ спр}})/P_{h \text{ эксп}}] \times 100 \% = [(300 - 72,3)/300] \times 100 \% \approx 75,9 \%$.

Из этого следует, что при расчёте силы подачи P_h по отношению к тангенциальной составляющей P_z необходимо использовать коэффициент 1,0: $P_{h \text{ эксп}}/P_{z \text{ эксп}} = 300/300 = 1,0$.

Боковая сила $P_{v \text{ эксп}} = 420$ Н намного больше рассчитанной, даже при наибольшем коэффициенте соотношения 1,0: $P_{v \text{ спр}} = 241$ Н. В этом случае погрешность расчёта составит $\Delta P_{v \text{ спр}} \approx [(P_{v \text{ эксп}} - P_{v \text{ спр}})/P_{v \text{ эксп}}] \times 100 \% = [(420 - 241)/420] \times 100 \% \approx 42,6 \%$.

Поэтому при расчёте боковой силы P_v по отношению к тангенциальной составляющей P_z необходимо использовать коэффициент 1,4: $P_{v \text{ эксп}}/P_{z \text{ эксп}} = 420/300 = 1,4$.

Радиальная сила $P_{y \text{ эксп}} = 420$ Н намного больше рассчитанной, даже при наибольшем коэффициенте соотношения 0,4: $P_{y \text{ спр}} = 96,4$ Н. В этом случае погрешность расчёта составит $\Delta P_{y \text{ спр}} \approx [(P_{y \text{ эксп}} - P_{y \text{ спр}})/P_{y \text{ эксп}}] \times 100 \% = [(420 - 96,4)/420] \times 100 \% \approx 77,0 \%$.

Поэтому при расчёте радиальной силы P_y по отношению к тангенциальной составляющей P_z необходимо использовать коэффициент 1,4: $P_{y \text{ эксп}}/P_{z \text{ эксп}} = 420/300 = 1,4$.

Осевая сила $P_{x \text{ эксп}} = 220$ Н намного больше рассчитанной, даже при наибольшем коэффициенте соотношения 0,55: $P_{x \text{ спр}} = 132,55$ Н. В этом случае погрешность расчёта составит $\Delta P_{x \text{ спр}} \approx [(P_{x \text{ эксп}} - P_{x \text{ спр}})/P_{x \text{ эксп}}] \times 100 \% = [(220 - 132,55)/220] \times 100 \% = 39,75 \%$.

Поэтому при расчёте осевой силы P_x по отношению к тангенциальной составляющей P_z необходимо использовать коэффициент 0,73: $P_{x \text{ эксп}}/P_{z \text{ эксп}} = 220/300 = 0,73$.

Заносим полученные коэффициенты соотношения в табл. 6.

Таблица 6

Относительные значения составляющих силы резания при фрезеровании по данным экспериментов для четырёхзубой концевой фрезы диаметром 16 мм из твёрдого сплава ВК8 без покрытия

Фрезерование	P_h/P_z	P_v/P_z	P_y/P_z	P_x/P_z
Фрезы концевые, работающие по схеме торцового фрезерования * (см. рис. 2)				
Несимметричное попутное	1,0	1,4	1,4	0,73

Для расчёта коэффициента и показателей степеней по данным экспериментов необходимо построить зависимости в двойных логарифмических координатах: $\lg P_{z \text{ эксп}} = f(\lg t)$.

Расчёт силы P_z для четырёхзубой концевой фрезы из твёрдого сплава без покрытия по данным справочника ($P_{z \text{ расч. спр}}$) [1] (табл. 4). При $t=1$ мм:

$$P_{z \text{ расч. спр}} = \frac{10 \times C_p \times t^x \times s_z^y \times B^u \times z}{D^q \times n^w} K_{Mp} = \frac{10 \times 12,5 \times 1^{0,85} \times 0,09^{0,72} \times 8^1 \times 4}{16^{0,73} \times 2586^{-0,13}} \times 0,93 =$$

$$= 86,81 \times 2586^{0,13} \times 1^{0,85} = 86,81 \times 2,777 \times 1^{0,85} = 241,1 \times 1^{0,85} = 241,1 \times 1 = 241,1 \text{ Н.}$$

$$P_{z \text{ эксп}} \approx P_{h \text{ эксп}} = 300 \text{ Н.}$$

Расчёт силы P_z по данным справочника ($P_{z \text{ расч. спр}}$) при $t=8$ мм:

$$P_{z \text{ расч. спр}} = \frac{10 \times C_p \times t^x \times s_z^y \times B^u \times z}{D^q \times n^w} K_{Mp} = \frac{10 \times 12,5 \times 8^{0,85} \times 0,09^{0,72} \times 8^1 \times 4}{16^{0,73} \times 2586^{-0,13}} \times 0,93 =$$

$$= 241,1 \times 8^{0,85} = 241,1 \times 5,856 = 1412 \text{ Н.}$$

Полученные данные использовались при построении графиков на рис. 3.

Показатель степени в таблице справочнике и в эксперименте совпадают: $x_{P_z \text{ расч. спр}} = \text{tg} \alpha = a/b = 90,5/104,4 = 0,86$; $x_{P_z \text{ эксп}} = 0,86$.

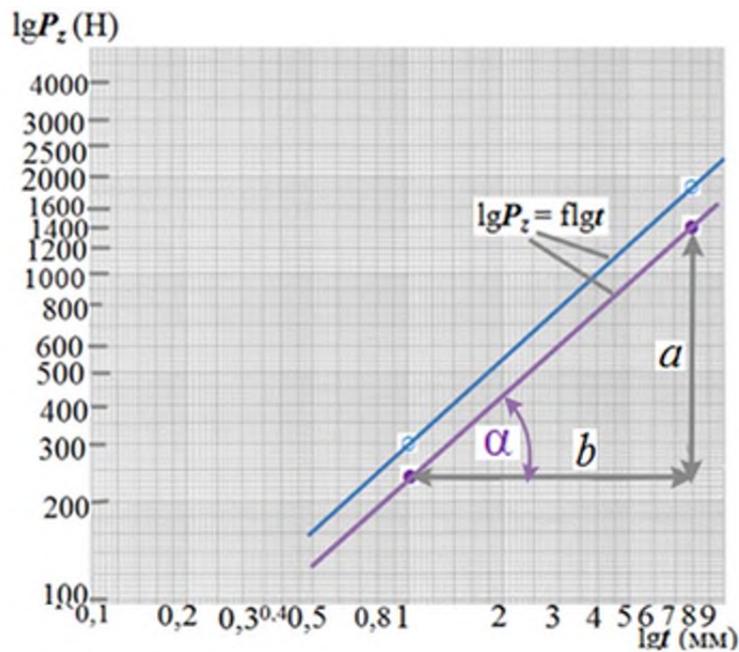


Рис. 3. Определение показателя степени $x_{P_z} = \operatorname{tg}\alpha = a/b = 90,5/104,4 = 0,86$ (графики на рис. 3 были существенно увеличены на мониторе компьютера для уменьшения погрешности при измерении размеров a и b). ● – по расчёту силы $P_{z \text{ расч. spr}} = f(t)$ из данных справочника [1]; ○ – из эксперимента

Выводы

1. Рассмотрена физическая модель фрезерования концевой фрезой. Определены направления составляющих силы резания в зависимости от схемы фрезерования и условий разложения сил при измерении с использованием динамометра.

2. Проведены стойкостные испытания при фрезеровании конструкционной стали 45 фрезой из твёрдого сплава. Установлены значения составляющих сил резания.

3. С использованием данных справочника проведены вычисления силы резания P_z . По данным эксперимента выполнены расчёты степенных коэффициентов и рассчитана величина погрешности, возникающая при вычислении составляющих сил резания.

Исследование финансировалось Российским научным фондом, проект № 23-79-10166.

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.